PIC.LA BIBL.CA DI SCIENZE MOD.NE

N.° 147.

FRAT.LLI BOCCA EDIT.RI

Piccola Biblioteca di Scienze Moderne

Eleganti volumi in-12°

1. Zanotti-Bianco. **In cielo.** Saggi di astronomia . . . . . . L. 2,50
2. Catherin. **Il Socialismo.** Suo valore teoretico e pratico. — (3ª edizione) . . . . . . » 2 —
3. Brücke. **Bellezza e difetti del corpo umano.** — (2ª edizione) » 2,50
4. Sergi. **Arii e Italici.** Attorno all'Italia preistorica. — Con figure » 3 —
5. Rizzatti. **Varietà di storia naturale.** — Con figure . . . » 5 —
6. Lombroso. **Il problema della felicità** . . . . » 3 —
7. Morasso. **Uomini e idee del domani.** — **L'egoarchia** . . . » 3,50
8. Kautsky. **Le dottrine economiche di C. Marx.** - (Sequestrato) » 3 —
9. Hugues. **Oceanografia** . . . . » 3,50
10. Frati. **La donna italiana** . . . . » 2 —
11. Zanotti Bianco. **Nel regno del sole** . . . . » 2,50
12. Troilo. **Il misticismo moderno** . . . . » 3 —
13. Jerace. **La ginnastica e l'arte greca.** — Con figure . . . » 3 —
14. Revelli. **Perchè si nasce maschi o femmine?** . . . . » 2,50
15. Groppali. **La genesi sociale del fenomeno scientifico** . . » 2,50
16. Vecchj e D'Adda. **La marina contemporanea.** — Con 90 fig. » 5 —
17. De Sanctis. **I sogni** . . . . » 5 —
18. De Lacy Evans. **Come prolungare la vita.** — (2ª edizione) . » 3 —
19. Straffforello. **Dopo la morte.** — (2ª edizione) . . . . » 3 —
20. Lassar-Cohn. **La chimica nella vita quotidiana.** — (2ª edix.) » 4 —
21. Mach. **Letture scientifiche** . . . . » 3,50
22. Antonini. **I precursori di Lombroso.** — Con figure . . . » 2,50
23. Trivero. **La teoria dei bisogni** . . . . » 2,50
24. Vitali. **Il rinascimento educativo** . . . . » 2 —
25. Disa. **Le previsioni del tempo** . . . . » 3 —
26. Tarozzi. **La virtù contemporanea** . . . . » 2 —
27. Straffforello. **La scienza ricreativa** . . . . . . » 3 —
28. Sergi. **Decadenza delle nazioni latine** . . . . . . » 4 —
29. Masè-Dari. **M. T. Cicerone e le sue idee economiche e sociali** » 4 —
30. De Roberto. **L'Arte** . . . . » 2,50
31. Baccioni. **La vigilanza igienica degli alimenti.** — Con figure » 4 —
32. Marchesini. **Il simbolismo** . . . . » 3,50
33. Naselli. **Meteorologia nautica** . . . . » 2,50
34. Niceforo. **Italiani del nord e italiani del sud** . . . . » 5 —
35. Zoccoli. **Federico Nietzsche** . . . . » 4 —
36. Loria. **Il capitalismo e la scienza** . . . . » 3,50
37. Osborn. **Dai Greci a Darwin** . . . . » 3,50
38. Ciccotti. **La guerra e la pace nel mondo antico** . . . . » 3,50
39. Rasius. **Diritti e doveri della critica** . . . . . . » 3 —
40. Sergi. **La psiche nei fenomeni della vita** — Con figure . . » 2,50
41. Henle. **La vita e la coscienza.** — Con figure . . . . . » 3 —
42. Baccioni. **Nel regno del profumo.** — Con figure . . . . » 2,50
43. Straffforello. **Il progresso della scienza** . . . . . . » 3 —
44. Minutilli. **La Tripolitania.** — Con una carta . . . . . » 3,50
45. Maeterlinck. **La saggezza ed il destino** . . . . . . » 3,50
46. Molli. **Le grandi vie di comunicazione** . . . . . . » 4 —
47. Vaccaro. **La lotta per l'esistenza** . . . . » 3 —
48. Grant Allen. **La vita delle piante.** — Con figure . . . . » 3 —
49. Zini. **Il pentimento e la morale ascetica** . . . . . . » 3 —
50. Mateeri. **L'eloquenza forense** . . . . » 2 —
51. Morasso. **L'imperialismo artistico** . . . . » 3,50
52. Lombroso. **I segni rivelatori della personalità.** — Con figure » 3 —
53. Oddi. **Gli alimenti e la loro funzione** . . . . » 4 —
54. Rossi. **I suggestionatori e la folla** . . . . » 2,50
55. Vaccai. **Le feste di Roma antica** . . . . » 3,50
56. Marchesini. **Il dominio dello Spirito** . . . . » 3,50
57. Sergi. **Gli Arii in Europa e in Asia.** — Con figure . . . » 3,50
58. Zanotti Bianco. **Istorie di mondi** . . . . » 4 —
59. Harnack. **L'essenza del Cristianesimo** . . . . » 4 —
60. James. **Gli ideali della vita.** — (2ª edizione) . . . . . » 3 —
61. Baccioni. **Dall'alchimia alla chimica.** — Con figure . . . » 5 —
62. Cappelletti. **La leggenda Napoleonica.** — Con figure . . . » 5 —
63. Mach. **Analisi delle sensazioni** . . . . » 4 —
64. Labanca. **Gesù Cristo.** — Con figure . . . . » 4 —
65. Anderson. **Le civiltà estinte dell'oriente** . . . . . . » 3 —
66. Cougnet. **I piaceri della tavola.** — Con figure . . . . » 5 —
67. Sighele. **L'intelligenza della folla** . . . . » 2,50
68. Hickson. **La vita nei mari.** — Con figure . . . . . . » 2,50

LA

NUOVA TEORIA DELL'ELETTRICITÀ

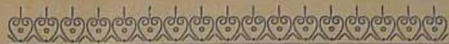
E. E. FOURNIER D'ALBE
B. Sc. (Lond.), A. R. S. Sc.
Autore della « Contemporary Electrical Science »

LA
Nuova Teoria dell'Elettricità

GLI ELETTRONI

PREFAZIONE
PER
G. JOHNSTONE STONEY
M. A., Sc. D., F. R. S.

(Con figure nel testo).

TORINO
FRATELLI BOCCA, EDITORI
MILANO - ROMA
—
1908

PREFAZIONE

È trascorso un secolo all'incirca dacchè Avogadro — nel 1811 — enunciava la famosa legge che porta il suo nome, secondo la quale i gaz perfetti, quando vengono portati allo stesso grado di pressione e di temperatura contengono a parità di volume un identico numero di molecole gassose. Il fenomeno era constatato, ma la causa rimase tuttavia ignota per molto tempo ancora, fino a che, verso la metà del secolo scorso, incominciarono a essere conosciute alcune delle energie proprie ai corpi gassosi. Fino all'epoca suddetta si supponeva erroneamente, anche dai più scrupolosi osservatori dei fenomeni naturali, che gli oggetti i quali, a giudicarne dall'impressione che ne ricevono i nostri sensi, sono nello stato di riposo — come ad es. i sassi, le monete, i libri, l'aria, dopo che fu lasciata tranquilla entro una camera — fossero effettivamente privi di qualsiasi moto interno.

Quanto ai gaz, uno degli esempi pratici che si adottava a quel tempo per semplificare la teoria nell'insegnamento si era che le molecole di un gaz si potevano verosimilmente paragonare alle bolle immobili di una schiuma le quali, nella dilatazione per effetto del calore, nella diminuzione di volume per il raffreddamento, nella compressione reciproca o contro le pareti del recipiente, si comportano in modo abbastanza simile ai gaz nelle identiche circostanze. In questo ordine di idee la legge di Avogadro si enunciava col dire che le bolle hanno tutte una identica dimensione qualunque sia il gaz a cui appartengono, se si paragonano fra loro allo stesso grado di temperatura ed alla stessa pressione.

Solo una sessantina di anni fa si incominciò a intravedere la luce di quella verità, ora constatata, che le molecole di ogni corpo e le parti di ogni molecola non si trovano mai allo stato di quiete ma sono, al contrario, animate di rapidi e regolari movimenti reciproci ed interni; chè, se i corpi ci appaiono come in quiete, è solo perchè questa grande attività interna che essi contengono si esplica su scala troppo piccola, le parti semoventi sono troppo minuscole, i movimenti soggetti a variazioni di direzione troppo rapide perchè i nostri sensi, sia pure coll'aiuto del microscopio, possano avvedersi dello svolgimento di questa complessa attività. Cosicchè, fino a quando non furono scoperti altri mezzi che venissero a sussidiare l'osservazione diretta dei fenomeni nella ricerca della verità, si rimase

nell'errore di credere che tutti i corpi della terra si potessero « portare allo stato di quiete » — e cioè si potesse sottrarli a qualsiasi movimento, tranne che al movimento tellurico dipendente dalla loro esistenza su di un pianeta che ruota intorno al suo asse, percorre un'orbita intorno al sole, e segue il sistema solare nelle sue peregrinazioni attraverso agli spazî.

Senonchè vi fu un uomo — un inglese — che, sessant'anni fa all'incirca, intuì che una tale interpretazione della natura era un errore, almeno in rapporto alle sostanze allo stato gassoso. J.J. Waterston nel 1845 presentò alla Royal Society una memoria in cui egli dimostrava che le proprietà constatate nei gaz perfetti indicano con grande evidenza che essi, invece di consistere di molecole stazionarie che si comprimono fra di loro, sono in realtà l'aggregato di corpi assai più piccoli, così piccoli da lasciare libera la maggior parte dello spazio in cui le particelle stesse si spostano rapidissimamente con enorme attività producendo una pressione gassosa coll'urtarsi reciproco e coll'urtare contro le pareti del recipiente che le respingono indietro. L'affermazione di Waterston conduceva a risultati in opposizione colle convinzioni degli scienziati di quel tempo cosicchè la sua grande scoperta, cogli argomenti a suo favore, non venne divulgata per lungo tempo; solo allorchè, pochi anni dopo, il Professore Clausius di Ginevra, scoperse di bel nuovo la costituzione cinetica dei gas, questo grande progresso nel cammino della scienza potè venire

portato a cognizione del pubblico. L'annunzio della nuova scoperta venne accolto con grande scetticismo. Malgrado di ciò Clausius persistette nel combattere magistralmente le obbiezioni fatte alla nuova teoria con pubblicazioni edite sul finire del settimo ed all'inizio dell'ottavo lustro del 19° secolo, nell'addurre prova su prova fino a che non si potè a lungo resistere all'evidenza della verità. Nello sviluppo ulteriore della sua teoria egli fu assistito da altri scienziati, fra cui J. Clerk Maxwell, in modo speciale.

Quando l'uomo investiga un ramo qualsiasi di scienza naturale è impossibile che possa giungere a formarsi una precisa cognizione dei fenomeni che a tale ramo appartengono ove egli non riesca a stabilire qualche dato relativo alle grandezze pertinenti ai fenomeni che osserva. Nel campo della fisica molecolare la prima grandezza che si stabilì fu la misura della velocità delle molecole nei gaz a cui Clausius pervenne dopo pazienti esperienze. In ogni singolo istante le varie molecole si spostano con velocità molto diversa, ma ad ogni grado di temperatura corrisponde una *velocità media* alla quale, nei conflitti fra molecole in moto nell'interno di un gaz, tendono a essere ridotte le velocità che troppo se ne discostano, ed intorno alla quale tendono di aggrupparsi le innumerevoli velocità diverse. La velocità media, così definita, non è la media aritmetica dei valori v, ma è la radice quadrata della media aritmetica dei valori v^2. Clausius pervenne a calcolare approssimativamente questa

velocità media in

$$485\sqrt{\frac{\tau}{273 \cdot \rho}} \text{ metri al secondo} \ldots\ldots 1\ (a),$$

in cui τ è la temperatura assoluta del gaz valutata in gradi centigradi e ρ il peso specifico del gaz paragonato coll'aria. Espressa in miglia all'ora tale velocità media è di

$$1085\sqrt{\frac{\tau}{273 \cdot \rho}} \text{ miglia all'ora} \ldots\ldots 1\ (b).$$

La media aritmetica delle diverse velocità che si verificano nel movimento delle molecole è diversa dalla media sopra stabilita. È alquanto inferiore e per ottenerla occorre moltiplicare il valore dato sopra per 0,92132. La media aritmetica risulta quindi di

$$447\sqrt{\frac{\tau}{273 \cdot \rho}} \text{ metri al secondo.}$$

Inoltre la temperatura ordinaria dei laboratori nel momento dell'esperimento può venire calcolata all'incirca in 16° C. avendosi un valore di

$$\tau = 289.$$

Sostituendo questo valore a τ, si trova una media *aritmetica* delle velocità a questa temperatura di

$$460\sqrt{\frac{1}{\rho}} \text{ metri al secondo} \ldots\ldots 2\ (a)$$

e cioè

$$1022\sqrt{\frac{1}{\rho}} \text{ miglia all'ora} \ldots\ldots 2\ (b)$$

cosicchè nell'aria che ci attornia ed alla temperatura ordinaria le molecole dei gaz principali che la compongono si muovono con una velocità di cui la media aritmetica è superiore ai 1000 miglia all'ora. Per ottenere la media aritmetica per ciascun costituente gassoso dell'atmosfera terrestre dobbiamo sostituire il valore di ρ relativo a ciascun gas nell'ultima formola. Possiamo così calcolare tale media relativamente all'azoto, all'ossigeno, all'argon, al vapore acqueo.

Altra grandezza molecolare importante che venne in seguito scoperta fu quella della lunghezza media della breve retta percorsa da ciascuna molecola d'aria fra due scontri consecutivi, determinata dal Prof. Maxwell nel 1859-1860. Tale quantità è, alla temperatura di 15° C ed alla pressione di un'atmosfera di

7,6 *eighthet* di metro..... 3

valore che è la media di tre diverse determinazioni fatte dal Maxwell (Un *eighthet* è la frazione rappresentata da una unità collocata nell'ottavo ordine di cifre decimali o dal simbolo 10^{-8}).

Conviene osservare qui che la lunghezza media del percorso libero delle singole molecole fra i successivi incontri, quantunque sia un valore enorme fra mezzo alle grandezze molecolari, è tuttavia inferiore al più breve intervallo che il microscopio possa rivelare. Due macchioline guardate al microscopio, ove anche siano separate da un intervallo doppio del suddetto, appaiono come sovrapposte e ciò anche nelle migliori con-

dizioni di osservazione, col microscopio più perfezionato e con perfetta scrupolosità nell'esperimento.

Paragonando questo piccolo valore con la media della distanza totale percorsa dalle molecole in un secondo, che abbiamo calcolata in 460 metri [v. equaz. 2 (a)], risulta che il cammino percorso da ogni molecola in un secondo è una corsa a *zig-zag*, suddivisa nel numero medio di 6.000.000.000 di piccole corse libere fra gli scontri successivi.

Dopo che Maxwell ebbe stabilita la lunghezza media del percorso libero, divenne facile effettuare un calcolo preliminare del numero delle molecole presenti e tale tentativo fu fatto dallo scrivente nel 1860 immediatamente dopo la pubblicazione del Maxwell. In questo primo calcolo si cercò di determinare quale sia la potenza di 1000 che si approssima maggiormente, nella serie geometrica, al numero di molecole contenute in un millimetro cubo di gaz. Si trovò che tale valore è la sesta potenza cioè 10^{18}; da cui segue che il numero effettivo delle molecole deve essere cercato nel gruppo di numeri compreso fra $10^{18} \div \sqrt{1000}$ e $10^{18} \times \sqrt{1000}$ cioè è un numero più grande di $3,16 \times 10^{16}$ e minore di $3,16 \times 10^{19}$. Altre determinazioni di questo importante dato fisico vennero fatte in seguito ed alcune fra esse ricavate da dati suscettibili di condurre ad una più esatta approssimazione. In conseguenza di tali determinazioni si può assumere il valore 4×10^{16} come abbastanza attendibile e prossimo al nu-

mero di molecole gassose contenute in un volume non molto diverso dal millimetro cubo, semprechè il gaz, o il miscuglio di gaz, venga mantenuto a pressione e temperatura costanti o pressochè costanti. A formare questo numero di molecole contenute in ciascun millimetro cubo di aria secca i costituenti principali dell'atmosfera del nostro globo concorrono all'incirca nelle seguenti proporzioni:

Azoto	4 × 7810 000000 000000	molecole di	N_2
Ossigeno . . .	4 × 2090 000000 000000	"	O_2
Argon	4 × 100 000000 000000	"	A
Biossido di carbonio	4 × 4 000000 000000	"	CO_2
Neon (all'incirca).	4 × 100000 000000	"	Ne
Elio (forse) . .	4 × 10000 000000 o 5000 000000	"	He

Sono pure presenti altri costituenti ma in quantità minori. Essi sono kripton, xenon, ed idrogeno e probabilmente alcune molecole di ammoniaca ed alcune di ossido d'azoto; e naturalmente sarà pure presente una quantità variabile di vapore acqueo se l'aria non è completamente secca.

Queste diverse determinazioni ci permettono di formarci una prima idea della vera costituzione di ciascun millimetro cubo dell'aria che ci attornia. Noi possiamo immaginare quella enorme moltitudine di particelle minutissime lanciate in ogni possibile direzione, ciascuna particella urtando successivamente, ed arrestando talvolta, ben sei mila milioni di altre particelle che la circondano, poi continuando la sua corsa per un

tratto di percorso libero, fra gli scontri successivi, con velocità variabili, ma sempre con velocità di tale grandezza che la loro media ammonta a più di 1000 miglia all'ora. Per quanto meravigliosa possa apparire questa descrizione noi vedremo subito che essa è quasi infinitamente inferiore alla realtà, che è assai più stupefacente. Questo possiamo affermare trovandoci oramai prossimi a compire un altro passo verso la realtà, passo che ci aprirà un nuovo campo assai più vasto comprendente fenomeni assai più complessi che avvengono in natura. Infatti, contemporaneamente all'effettuazione di quelle ricerche che dovevano rivelare la costituzione cinetica dei gaz, si compievano, pure nel secolo scorso, altre ricerche relative a fenomeni ancora più misteriosi che avvengono in natura. Prima di inoltrarci nel campo di queste nuove investigazioni sarà utile richiamare il fatto sopra citato, che i periodi di tempo in cui si compiono i percorsi liberi delle molecole pur essendo di valore svariatissimo, la media di essi è un valore di circa sei mila milionesimi di secondo. Paragoniamo ora questo brevissimo periodo di tempo coi periodi molto più brevi che si connettono al fenomeno che chiamiamo luce. Dal paragone risulta che mentre una molecola di aria percorre una sola corsa fra due incontri successivi, sono avvenute, in media, ben 60.000 doppie vibrazioni di luce rossa, e due volte altrettante dei raggi estremi violetti e siccome i periodi di tutti i movimenti che avvengono in una molecola attraversata dai raggi

visibili dello spettro devono essere compresi in questi limiti, dobbiamo ammettere *a fortiori* ovvero che tale numero immenso di movimenti lungo un'orbita si è prodotto, in media, entro la molecola nel periodo di tempo in cui essa ha compiuto una singola corsa, ovvero che un movimento periodico speciale si è verificato d'indole così complessa che la sua risoluzione deve dare quell'immenso numero di orbite componenti. Non riuscirà quindi sorprendente che la perturbazione temporanea producentesi nel cammino di due molecole durante la loro collisione si effettui, nella maggior parte dei casi, in un tempo assai breve paragonato all'intervallo frapposto tra due urti successivi, per modo che la maggior parte dei movimenti che avvengono nella molecola possono compiersi nel modo regolare che è rivelato dalla continuità della linea di uno spettro gassoso.

Gli elementi chimici sono, in parte, costituiti da gaz allo stato in cui li conosciamo abitualmente. Alcuni altri possono venire vaporizzati in un becco Bunsen ed i rimanenti possono venire vaporizzati e resi incandescenti mediante l'arco elettrico, ovvero, per lo meno, ridotti in condizione tale — collo scoccare di una scintilla fra gli elettrodi dell'elemento — che le molecole si distacchino e percorrano delle corse libere come nei gaz. In tutti questi casi ciascun elemento dà uno spettro particolare in cui ciascuna linea è prodotta da un raggio di luce col periodo di ondulazione che gli compete. Questi spettri ci rivelano la mirabile regola-

rità dei movimenti che avvengono nell'interno delle molecole di ogni elemento, quando esse sono libere da ogni interferenza colle molecole vicine, ed in pari tempo ci rivelano la complessità del movimento stesso ed altre informazioni di grandissima importanza scientifica riguardo alle condizioni reciproche degli elementi. Ma la deduzione più importante che si può ragionevolmente ricercare non è stata fino ad ora ricavata. Nessuno è riuscito, fino ad oggi, a dedurre, dalla periodicità, dall'intensità e dalle altre caratteristiche delle linee dello spettro di ciascun elemento, quale sia il movimento che deve essere avvenuto fra gli elettroni nell'interno delle molecole per produrre questi effetti determinati. Questa cognizione ci è rivelata dalla natura nello spettro esposto ai nostri sguardi, ma essa vi sta scritta in una lingua che è tuttora indecifrabile. Speriamo che questa grande scoperta, di cui le traccie già si presentano innanzi a noi con chiarezza, possa venire effettuata senza ritardo. Le basi sono state gittate con molte investigazioni importanti fra cui quelle di Rydberg, di Kaiser e di Runge sulle serie di linee che compongono gli spettri dei varî elementi, e colle correlazioni che sono risultate dal confronto di tali investigazioni. Lo studio del fenomeno di Zeeman, studio che, com'è lecito sperare, verrà completato entro un tempo non molto lungo; i fenomeni osservati e studiati con molta sagacia dal prof. J. J. Thomson relativi ai corpuscoli formanti ciascuno un elettrone o di cui ciascuno

contiene un elettrone, sono tante lettere di questa lingua misteriosa che dobbiamo decifrare. Lo scrittore della presente opera è il primo che si avventura in questo compito laborioso. A tutto questo possiamo aggiungere i seguenti dati dinamici accertati: che lo spettro, quale appare ai nostri occhi, è causato dai movimenti impartiti agli elettroni — o più probabilmente a uno o due fra essi — dagli scuotimenti di ogni molecola che seguono immediatamente la collisione con un'altra molecola, e accompagnano il ritornare della molecola allo stato permanente che susseguè ad un qualsiasi spostamento periodico nell'interno della molecola — tutto questo come viene modificato dal fatto che dell'energia sfugge dagli elettroni nell'etere che li circonda.

Quando un gaz si condensa passando allo stato liquido o si solidifica, lo spazio libero interposto fra le sue molecole si annulla, o per lo meno diminuisce tanto che le perturbazioni cagionate da un urto non hanno tempo di cessare nel periodo di corsa di una molecola fra due urti successivi. Ne consegue che lo spettro di questo corpo non può più essere attribuito ai movimenti che avvengono entro molecole libere da interferenze esterne. Quando un gaz sta condensandosi, i movimenti entro una molecola la quale sia stata disturbata da una collisione, continuano ad essere movimenti irregolari per un periodo (che aumenta in modo proporzionale) della corsa sempre più breve della molecola. Quindi le linee dello spettro diventano gradatamente meno de-

finite; col progredire della condensazione del gaz le linee spettrali si allargano e finalmente si sovrappongono e presentano l'apparenza di uno spettro così detto continuo che occupa in alcuni casi una parte, ed in altri casi tutto intero lo spettro. Di questa specie sono gli spettri dati dalla maggioranza degli elementi solidi e liquidi quando sono resi incandescenti mediante il calore, o quando gli elettroni che sono situati presso la superficie del corpo stesso sono stati messi in movimento da luce incidente che li colpisca, e questo ultimo stato è quello in cui si trovano tutte le cose a noi più famigliari. In ogni caso possiamo ritenere che gli oggetti diventano visibili quando gli elettroni negativi e la massa di elettricità positiva nell'interno di ogni atomo chimico sono stati spostati reciprocamente e ad essi è stato impartito uno scuotimento tale da eccitare ondulazioni luminose nell'etere circostante.

Anticamente la miglior concezione che l'uomo poteva formarsi di un gaz si era quella di paragonarlo ad una schiuma composta di bolle, le molecole del gaz essendo appunto rappresentate dalle singole bolle della schiuma. A quel tempo gli scienziati stessi non supponevano che una qualsiasi attività potesse esistere e manifestarsi nell'aria tranquilla. Più tardi, quando si constatò la costituzione cinetica dei gaz, la prima rozza concezione venne sostituita da altra più esatta in cui le molecole venivano paragonate a proiettili lanciati intorno con mirabile forza, il numero

di tali molecole potendo essere calcolato, come pure la velocità media molecolare con cui si muovono, e la lunghezza media delle loro brevi corse. Una concezione ulteriore della natura, ancora più esatta e più recondita, fu raggiunta quando si constatò che le molecole sono assai più che proiettili semplici, poichè durante le loro corse dei fenomeni impercettibili avvengono nel loro interno, fenomeni che importano il prodursi di rapidi e diversi orientamenti dell'elettricità di cui le molecole sono cariche, ed in conseguenza la trasmissione delle forze alternative elettro-magnetiche in forma di onde attraverso all'etere circostante. Siamo quindi condotti a quantità più piccole che non ai minuscoli proiettili dianzi contemplati, cioè *agli elettroni negativi*, il numero dei quali in ogni atomo chimico pare sia eguale (da quanto risulta da una notevole ricerca del prof. J. J. Thomson) al quoziente del suo peso atomico diviso per quello dell'idrogeno (1); ciascun atomo contenendo delle cariche positive in numero eguale alla somma dei suoi elettroni negativi, ma non equivalente alla somma di elettricità negativa suddivisa nei vari elettroni. Per tal modo l'elettrone viene a presentarsi a noi sotto l'aspetto di una nuova quantità. E forse esso stesso non è altro che un complesso sistema in cui si vanno compiendo continuamente altri

(1) Esperimenti più recenti dimostrarono che il nucleo positivo contiene la maggior parte della massa dell'atomo.

occulti fenomeni. Se questa ipotesi potesse verificarsi non ci troveremmo noi condotti in presenza di *parti* attive componenti l'elettrone? E rispetto a queste parti chi potrebbe rifiutare l'identica ipotesi? Non vi è infatti indizio alcuno che autorizzi a supporre dei limiti alle suddivisioni infinitesimali del regno naturale. Nulla in natura pare vi sia di tanto piccolo da escludere l'ipotesi che esso sia costituito da particelle incessantemente attive.

La posizione presente della scienza è stata raggiunta con lento progresso ed è ragionevole sperare che i nostri successori progrediranno sempre, poichè anche per la scienza non si scorge alcun limite possibile. Lo studioso che stesse oggi per avventurarsi in questa regione delle scienze naturali potrà ricavare grande vantaggio dal prefiggersi come punto di partenza quell'immagine della natura che si è venuta formando nella mente pensosa di uno studioso delle presenti condizioni della scienza, così come egli la viene esponendo nelle pagine che seguono. Tale immagine dovrà tuttavia essere considerata non come una lastra stereotipica che deve restare immutata, bensì come un aggruppamento di tipi amovibili ma disposti bene e solidamente, suscettibili di ricevere con facilità qualsiasi perfezionamento che il futuro vi apporterà, pur rimanendo prima e dopo ogni correzione così fermamente fissi al telaio che li accoglie da poter venire usufruiti nel modo più efficace.

Concludendo questa prefazione io vorrei an-

cora richiamare l'attenzione dei cultori della fisico-matematica sulla importante tavola di valori enunciata dal sig. Fournier nell'ultimo capitolo di questo libro, nella quale si sono assai diminuite le oscurità e le incertezze delle tavole usuali mediante l'adozione di quattro unità fondamentali, cioè: unità di massa, di elettricità, di lunghezza e di tempo, e invitarli a paragonare questo semplice sistema cogli altri sistemi meno soddisfacenti in cui la capacità elettrica d'induzione deve venire ammessa senza che si possa attribuirle alcun valore.

Settembre, 1906.

G. Johnstone Stoney.

INDICE

INDICE DEI DIAGRAMMI

CAPITOLO I.

Introduzione.

Oggetto di questo lavoro si è quello di offrire al lettore un'esposizione concisa ed organica della nuova teoria sull'elettricità e sul magnetismo, teoria che, pur essendo ora generalmente accettata, viene tuttavia raramente accolta dai libri di testo elementari. La nuova teoria ci offre una spiegazione dei fenomeni elettrici e magnetici, inconcepibile nel tempo in cui la vera natura dell'elettricità era completamente ignorata. Sappiamo oggidì che l'elettricità è una specie di sottilissimo fluido, composto di *elettroni* o corpuscoli minutissimi di grandezza circa trentamila volte inferiore a quella degli atomi della materia ordinaria. La teoria degli elettroni è quella teoria che spiega tutti i fenomeni elettrici e magnetici colla diversa orientazione e col movimento di questi elettroni. Il primo passo da farsi nella parte di scienza che si occupa dell'elettricità è dunque quello di acquistare una chiara

cognizione della natura e delle proprietà dell'elettrone. Semplicità e chiarezza sono le norme essenziali che io mi sono prefisso nell'esporre ai lettori queste nozioni, ed io spero che i principî essenziali della scienza potranno essere compresi in modo da poter essere applicati ai problemi della pratica anche da quelli le cui cognizioni matematiche non si estendono oltre le regole elementari dell'algebra.

Ogni teoria ha una duplice funzione: anzitutto quella di raggruppare in ordine proprio una grande quantità di fenomeni raccolti isolatamente; in sèguito quella di rivelarci la correlazione intima di tali fenomeni, cosicchè ci sia reso possibile di dedurli l'uno dall'altro e di provocarne dei nuovi capaci di produrre degli effetti dianzi ignorati. La teoria dell'elettrone adempie a questa duplice funzione con tale efficacia che non fu mai raggiunta, neanche lontanamente, dalle precedenti teorie dirette a spiegare i fenomeni elettrici.

In nessun ramo della scienza umana si incontrarono maggiori difficoltà per costrurre una teoria soddisfacente, che nella scienza dell'elettricità. La varietà ingannatrice dei fenomeni, la corrente inestinguibile di nuove scoperte e di nuovi trovati, il carattere sovvertitore di molti fra essi, la intangibile natura dell'agente, tutto questo concorse a rendere assai difficile l'enunciazione di una teoria che non trascurasse alcuno degli elementi raccolti. Ma l'ardua ricerca ebbe alla fine ricompensa adeguata. Oggidì si hanno più nozioni intorno all'atomo dell'elettricità che

non intorno all'atomo della materia ponderabile. Noi possiamo ormai contemplarlo come la forza produttrice degli antichi fenomeni della pallina in midollo di sambuco, delle foglioline d'oro e dell'asticina di vetro strofinata. Noi lo scorgiamo in rapidissimo movimento nell'interno di un tubo vuoto, ed in lento spostamento lungo il filo trasmettitore delle correnti, e più non ci appare quale mistero imperscrutabile come or sono dieci anni. Noi lo osserviamo nascente qua e là nelle correnti alternate, e seguiamo le onde che esso irradia nella trasmissione senza fili. Noi immaginiamo il suo movimento lungo un'orbita intorno all'atomo a cui aderisce e lo spettacolo di tutti i fenomeni magnetici viene in luce in modo mirabile. Noi lo possiamo seguire trascinato dagli stessi atomi nell'interno della cellula elettrolitica e ci inoltriamo così nei misteri della chimica, per modo che questa vasta scienza risulta pressochè ricostruita dalle sue basi. E non solo questa nuova concezione ci guida a scoprire una pratica correlazione fra le rivelazioni delle scienze fisiche e chimiche; ma apre alla nostra mente altri campi inesplorati. Si collega alle mutazioni che avvengono negli elementi, alla costituzione ed alla distruzione della materia, alla spiegazione dell'inerzia, ed a una teoria della meccanica a base di elettricità, quasi reazione violenta alla influenza, ovunque pervadente, delle concezioni meccaniche. La teoria dell'elettrone, la più recente e la più estesa delle teorie scientifiche generalizzatrici, è adeguata ricompensa alle ri-

cerche laboriose continuate per ben 150 anni consecutivi. Al suo trionfo si collega (circostanza non solita ad avverarsi) il fatto che essa viene a completare, anzichè a soppiantare, le antiche teorie. Essa arieggia la teoria del fluido unico enunciata da Franklin, in quanto ricollega tutti i fenomeni elettrici colla varietà di orientazione e di movimento di una specie di gas capace di esercitare una pressione e munito di struttura atomica. Essa completa le speculazioni analitiche di Ampère e di Weber, conferendo loro il *substratum* materiale, e si innesta finalmente nella teoria sull'etere di Maxwell e di Hertz, spiegando che cosa siano in realtà quelle linee e quei fasci di forze la cui orientazione e movimento formarono parte importante, anzi quasi esclusiva, della teoria elettro-magnetica di ieri.

Tutto questo può in parte compensare il silenzio diffidente che accolse l'apparire della nuova teoria nel campo dell'elettricità. Essa non venne annunziata da un eccheggiare di trombe, nè venne accolta con violenta opposizione da parte dei seguaci dell'antica scuola. Nessun uomo può rivendicarne la priorità. L'elettrone piombò, per così dire, nella soluzione soprasatura dei fenomeni elettrici e fornì il nucleo della cristallizzazione. Una dopo l'altra le singole molecole — cioè i fenomeni elettrici — si disposero intorno al rispettivo asse, e ciascuna suddivisione della scienza dell'elettricità si collocò al proprio posto, come cristallo su cristallo: prima la diffusione, poi l'elettrolisi, quindi le scariche nei gas, i raggi

del *radium*, la conduttività metallica ed infine il magnetismo.

Ma il cristallo complessivo non è ancora definitivamente composto. La teoria dell' elettrone deve assorbire ogni minimo particolare, deve assimilare tutta la estesa serie dei fenomeni raccolti, deve trovare un posto nell'edifizio per ogni pietra ancora isolata, deve rafforzare ogni punto debole e molti ancora ve ne sono quantunque vadano ogni giorno diminuendo di numero e d'importanza.

I nostri libri di testo, sempre ritrosi ad accogliere ogni innovazione, devono gradatamente venire indirizzati a questo nuovo ordine di idee. Ad essi si deve dare forte incoraggiamento a pronunziare la parola « elettricità », parola che essi usavano dianzi con parsimonia, come voce priva di ogni significato! Lo scienziato si era abituato a parlare di « elettrizzazione » e di « quantità elettrica » come delle sole cose a sua conoscenza e abbandonava l'uso (e l'abuso) della parola « elettricità » ai profani. I teorici dell'elettricità trovarono un rifugio nelle equazioni differenziali di quantità astratte, applicando ad esse le regole della matematica, *alias* generalizzando col calcolo le risultanze degli esperimenti.

L'esperimentatore, che non possedeva l'abilità del matematico, ma aveva famigliarità col modo di comportarsi dei corpi e della materia per la quotidiana esperienza, trovava che il corredo di idee così acquistate non lo aiutavano ad appro-

fondire le sue nozioni intorno alla natura dell'elettricità. Egli fece quanto seppe di meglio per applicare l'incompleto materiale delle « linee di forza » di Faraday alla risoluzione dei problemi d'induzione e ottenne infatti risultati tali da sbalordire tutto il mondo industriale.

Quali mirabili applicazioni pratiche saprà egli ricavare quando avrà fatta interamente sua la teoria dell'elettrone?

La nuova teoria sarà definitiva o verrà soppiantata da un'altra? Questo è un quesito grave assai; assai più grave per i professori e più adatto ai teorici della scienza che non all'esperimentatore ed all'ingegnere. In un certo senso, nessuna teoria può mai dirsi definitiva. Una teoria definitiva segnerebbe la morte della scienza. Quando un uomo costruisce una teoria nuova, egli trionfa nel vederla confermata ovunque intorno a sè, ma se anche egli constata un caso in cui la sua teoria fallisce, egli dovrebbe egualmente trionfare nella gioia di aver scoperto una verità nuova, non compresa implicitamente nella sua teoria. Ma una teoria può essere definitiva in quel senso in cui è definitiva la teoria della gravitazione universale scoperta dal Newton. Questa teoria si riferisce a tutta la materia ponderabile a distanze superiori allo spazio intermolecolare. La teoria degli elettroni si riferisce a tutte le sostanze elettrizzate o magnetizzate ed è tale da poter comprendere come caso speciale la gravitazione. Se riescirà a coordinare in un solo sistema tutti i fenomeni elettrici e ma-

gnetici (a tacere dei fenomeni chimici e meccanici), essa assumerà un valore permanente ed inestimabile. Se riescirà nell'analisi dell'atomo chimico, le sarà dato di annientare un'altra di quelle complessità naturali intorno a cui l'intelletto umano sempre si è cimentato con impazienza: la varietà degli elementi chimici. Il progredire su questo cammino avrà per effetto di unificare le scienze fisiche e di aprire la via che guida nel campo infinitamente più complesso che accoglie i fenomeni della vita.

CAPITOLO II.

Origine e sviluppo della teoria dell'elettrone.

Il primo serio tentativo di enunciazione di una teoria dell'elettricità che non fosse limitata all' indeterminatezza della ipotesi, fu quello di Benjamin Franklin, il quale, nel 1750, colla lettera a Collinson, esponeva la teoria del fluido unico. Egli suppose l'esistenza nell' universo di un sottilissimo fluido o « fuoco elettrico », suscettibile di essere attratto dalla materia comune, ma le cui particelle sono in istato di ripulsione reciproca. Questo fluido può penetrare nei metalli, ma non nei corpi isolatori. Essendo però attratto da questi ultimi corpi, il fluido si deposita soltanto alla loro superficie. Per spiegare il fenomeno dell' elettrizzazione di un' asticina di vetro mediante lo sfregamento, Franklin fece la ipotesi che il vetro, dilatandosi per effetto del calore, assuma una quantità maggiore di fluido

che non nelle sue condizioni ordinarie, e poscia nel raffreddamento tenti di ripristinare lo stato antecedente. Questa spiegazione pare alquanto forzata; dobbiamo però tenere presente che l'elettrizzazione per sfregamento è tuttora il meno spiegato fra tutti i fenomeni elettrici.

La teoria di Franklin, per essere logica, doveva ammettere che gli atomi della comune materia si respingono reciprocamente; ma si vide immediatamente come tale presupposto contrastasse coi fenomeni della gravitazione e della coesione. Ma l'intima analogia che esiste fra la teoria del fluido unico enunciata dal Franklin e la teoria dell'elettrone può essere rilevata enunciando quest'ultima colle parole stesse di Franklin, come segue:

« Per tutta la natura corporea è sparsa una « sottilissima materia che comprende la ragione « e la causa di tutti i fenomeni elettrici. Le par« ticelle di questo fluido si respingono a vicenda. « Qualsiasi materia allo stato normale contiene « una determinata quantità di questo fluido. Se « mai avvenisse che una porzione qualsiasi di « materia fosse privata di una parte di tale quan« tità determinata, essa attrarrebbe il fluido con « una energia proporzionale alla quantità che ha « perduto, e respingerebbe un'altra porzione di « materia che avesse sopportato una diminuzione « consimile. Tutti i fenomeni elettrici sono do« vuti alla varietà nella distribuzione e nel mo« vimento delle particelle di questo fluido ».

La teoria di Franklin si dimostrò fallace quando

si cercò di spiegare con essa il fenomeno dei conduttori e degli isolatori. Franklin suppose che i conduttori potessero accogliere il fluido ed immagazzinarlo, per così dire, in tutta la sostanza che li compone, mentre invece gli isolatori lo immagazzinano solamente alla loro superficie. La versione attuale si è invece che i conduttori ricevono una quantità eccedente del fluido, entro limiti dipendenti dalle circostanze, e accumulano tale eccedenza soltanto alla loro superficie. Al contrario, tali corpi non possono venire privati di una quantità di fluido che menomi quella « quantità determinata » accennata dianzi. La differenza fondamentale che esiste fra la spiegazione antica e la moderna risiede tuttavia nell'uso delle parole « positivo » e « negativo ». In un momento critico per la scienza si chiamò elettricità positiva quella che si svolgeva sul vetro strofinato e negativa quella che si svolgeva sulla resina. La terminologia poteva apparire giustificata dal fatto che le due elettricità si neutralizzavano a vicenda; ma nessun indizio conduceva a scoprire quale fosse delle due specie il fluido unico e reale. Si suppose, a caso, che l'elettricità vitrea fosse il fluido e per 150 anni i segni algebrici continuarono a essere disposti in relazione con questo presupposto e continuano ancora presentemente. Così noi parliamo del « polo positivo » di una batteria come del polo da cui emana apparentemente l'elettricità vitrea, mentre che invece sappiamo ora che, se mai esiste un flusso, esso si dirige *verso* quello stesso polo, il flusso

di direzione contraria essendo insignificante in paragone del primo. Questa differenza fondamentale non è apparente nella versione che abbiamo dato sopra della teoria dell'elettrone secondo le idee del Franklin, ma costituisce fra le due teorie una differenza radicale che frappone grave ostacolo al tentativo di popolarizzare una terminologia più logica. Noi dobbiamo imparare che l'elettricità « negativa » è l'*elettricità* e che la corrente negativa è *la corrente*. Nel periodo attuale di transizione occorre avere molta cura nel prevenire ogni confusione possibile e più oltre verrà indicato un mezzo atto a questo scopo.

La teoria del fluido unico, come abbiamo visto, non riuscì a spiegare in modo esauriente il fenomeno dell'elettrizzazione per frizione. Perciò, quando nel 1759, Symmer enunciò la sua teoria del doppio fluido, essa venne accolta con molta simpatia e fu signora del campo fino a tanto che i fenomeni constatati nei tubi vuoti rivelarono una differenza essenziale fra l'elettrizzazione positiva e la negativa.

Le teorie del fluido appaiono come meravigliosamente ingegnose se si pensa alla scarsità del materiale su cui esse si fondarono. Nel turbine invadente delle successive scoperte queste teorie furono come le stelle conduttrici appena visibili in un'atmosfera nebulosa. Talvolta esse furono pressochè perdute di vista nell'affollarsi dei nuovi fenomeni e delle nuove induzioni, ma altre forze vigilavano per apportare l'ordine in

quel caos. La forza più efficace fu il progredire nella determinazione dei valori. L'elettrometro di Lane, nel 1781, segnò l'inizio vero della scienza dell'elettricità, se si accetta la sentenza che « la scienza è misura ». La bilancia di torsione del Coulomb (1784-1788) ci diede due nuove leggi da aggiungersi alla legge di Newton sulla gravitazione. I matematici avevano già incominciato ad applicare queste nuove leggi con risultati proficui, allorchè il mondo scientifico fu sconvolto dalla rana di Galvani nel 1791 e mantenuto nello stato di agitazione dalla lunga controversia fra Volta e Galvani sopra l'esistenza di un terzo fluido che Galvani persisteva nel voler indicare col nome di « elettricità animale ». La pila di Volta, nel 1799, seguìta dalle esperienze di elettrochimica di Cruikshank e di Davy chiusero il secolo decimottavo, che lasciò la teoria dell'elettricità in uno stato di grande confusione ed i suoi cultori rivaleggianti in interminabili dissensi.

Questo stato di cose, contemporaneo alle guerre napoleoniche, precedeva un rilassarsi delle ricerche nel campo dell'elettricità, che durò per tutto l'inizio del secolo decimonono. Non vi è quasi nulla di notevole nel periodo fra il 1800 e il 1820, se si eccettuano le ipotesi di Grotthus il giovane (1805) e le applicazioni della matematica all'elettricità ed al potenziale magnetico di Poisson (1816), basate sulle leggi del Coulomb. Per contro i vent'anni successivi furono apportatori di una serie enorme di scoperte difficilmente dianzi accumulate in un tempo così breve, quan-

tità che rimase senza eguale fino alla rivoluzione del 1896. Ampère, Oerstedt, Biot, Savart, Seebeck, Ohm, Peltier, Faraday, Weber e Joule sono tutti compresi in questo periodo. Un' invasione di genî ed una vera falange di scienziati.

Oerstedt, nel 1820, gittò, per così dire, il primo ponte fra l'elettricità ed il magnetismo. Seebeck collegò l'elettricità al calore, e Faraday i fenomeni dell'elettricità a quelli del moto, e gettò le basi delle due grandi teorie moderne sull'elettricità e sul magnetismo: la teoria dell'etere enunciata dal Maxwell e la teoria dell'elettrone. Quest'ultima base fu dal Faraday stabilita, a dir il vero, inconsciamente, essendo egli inclinato di preferenza a investigare quanto avveniva nel mezzo circondante i corpi che non nell'interno dei corpi stessi.

Dal punto di vista della moderna teoria dell'elettrone è interessante la lettura di alcuni tratti delle « Opere » di Weber, dove egli pare presentire la teoria atomica dell'elettricità. Nel volume IV, ad esempio (p. 279), leggiamo: « Considerando la distribuzione generale dell'elettricità « possiamo ritenere che ad ogni atomo ponderabile aderisce un atomo elettrico ». Così pure, a pag. 281: « Chiamiamo e la particella elet« trica positiva; chiamiamo $-e$ una particella « negativa eguale ed opposta. Supponiamo che « soltanto *quest'ultima* particella abbia un atomo « ponderabile ad essa aderente e che la sua « massa venga quindi accresciuta a una dimen-

« sione tale che la particella positiva scompaia
« nel paragone. Possiamo allora considerare la
« particella — e come stazionaria e la particella
« + e allo stato di rivoluzione intorno a — e ».
[Sono state scritte in carattere diverso le parole
che mostrano come la concezione di Weber fosse
esattamente l'inverso della concezione moderna].
E prosegue: « Le due particelle differenti, allo
« stato di aggregazione molecolare sopra descritto,
« rappresentano quindi una corrente molecolare
« Ampère, perchè si può dimostrare che esse
« adempiono alle condizioni verificate da Ampère
« per la produzione delle correnti molecolari ».
Finalmente, a pag. 292, si legge: « La *forza*
« *viva* di tutte le correnti molecolari presenti in
« un conduttore aumenta, quando questo sia
« percorso da corrente, proporzionalmente alla
« resistenza ed al quadrato dell'intensità di cor-
« rente ».

Sostituendo l' « elettrone » alle « correnti molecolari » si ottiene press'a poco la moderna concezione della conduttività dei metalli.

Le date più importanti nella carriera scientifica del Faraday furono il 1831 e il 1833. Nel 1831 egli scoperse l'induzione elettro-magnetica, ed ottenne, rispetto alla corrente alternativa, quanto Oerstedt aveva ottenuto per la corrente continua, cioè stabilì il legame intimo fra l'elettricità e il magnetismo. Questa scoperta lo portò naturalmente a dedicare la sua attività di preferenza allo studio dei fenomeni relativi al mezzo dielettrico anzichè a sostanze conduttrici. Due

anni più tardi egli faceva un' altra scoperta di importanza grandissima, la quale doveva presto o tardi guidare alla formazione di una teoria atomica dell'elettricità. Scopriva cioè che quando due metalli o altri elementi di eguale valenza sono depositati o si sviluppano in una cella elettrolitica, le quantità di elettricità consumate (misurate coll'elettrometro di Lane o con altro strumento) sono inversamente proporzionali ai pesi atomici degli elementi. In altre parole, l'elettricità aderente a ciascun atomo avente una valenza determinata, è sempre in quantità costante e nel caso di un metallo bivalente, ciascun suo atomo è associato con una quantità di elettricità doppia della usuale quantità atomica.

In una lettura su Faraday, Helmoltz commentava questa scoperta con le parole seguenti: « Se « noi accettiamo l'ipotesi che tutti gli elementi « sono composti di atomi, non possiamo rifuggire « dalla conclusione che l'elettricità, così la posi« tiva come la negativa, sia suddivisa in particelle « elementari definite che si comportano come se « fossero atomi di elettricità ».

James Clerk Maxwell, il quale, seguendo le orme del Faraday, costruì una meravigliosa ed accreditata teoria basata sulle proprietà del mezzo, intuì egli pure tutta la forza di questa logica deduzione, senza poterla svolgere in modo esauriente a cagione della carestia di dati sperimentali. Nella prima edizione del suo libro « Elettricità e magnetismo », apparsa nel 1873, egli scrive (p. 312): « Supponiamo tuttavia di superare questa diffi-

« coltà coll'asserire senz'altro che le cariche mo-
« lecolari hanno un valore costante, e coll'indi-
« care, per semplicità di esposizione, questa
« carica molecolare costante col nome di « atomo
« di elettricità ». Ma più oltre egli aggiunge: « È
« molto improbabile che noi, quando saremo
« giunti a comprendere la vera natura del feno-
« meno di elettrolisi, possiamo mantenere in
« qualsiasi forma la teoria delle cariche moleco-
« lari, poichè allora noi avremo già trovata
« una solida base su cui costruire una teoria
« esatta delle correnti elettriche, abbandonando
« per tal modo tutte le altre teorie ipotetiche ».

Le previsioni di Maxwell su questo punto andarono fallite, poichè la teoria delle « cariche molecolari » è ora pacifica signora del campo, dopo aver riportato vittoria decisiva in quattro battaglie e contro avversari nemmeno prevedibili nel 1873.

Immediatamente nell'anno successivo un fisico irlandese, G. Johnstone Stoney, al Congresso della « British Association » in Belfast, richiamava l'attenzione degli scienziati sull' « atomo elettrico », come su di una delle tre unità fondamentali della natura fisica (essendo le altre la velocità della luce e la costanza della gravitazione) ed esponeva un calcolo approssimativo del suo valore. Egli disse infatti (1): « La natura,

---

(1) V. *Scientific Proceeding* della Società Reale di Dublino, febbr. 1881, pag. 54; *Philos. Mag.*, maggio 1881, pagg. 385, 386.

« nei fenomeni di elettrolisi, ci presenta sempre « un'unica, costante quantità di elettricità, indi- « pendente dalla specie diversa dei corpi in « azione. Per rendere più chiaro questo concetto « io formulerò la « legge di Faraday » con ter- « mini che varranno meglio a precisarlo: Ad « ogni vincolo elettrico che si spezza nell'interno « di un elettrolito, questo viene percorso da « una determinata quantità di elettricità, quantità « che rimane costante col variare dei casi. In- « dicherò con E_1 questa quantità costante di « elettricità ».

Egli calcolò la carica effettiva dividendo la quantità di elettricità richiesta per l'elettrolisi di 1 cm.³ di idrogeno per il numero di atomi di idrogeno contenuto in 1 cm.³, secondo il calcolo di Loschmidt, e trovò 10^{-20} « ampères » (ora chiamata l'unità assoluta di misura elettro-magnetica). Questa cifra concorda bene coll'ultimo valore dell'elettrone, cioè $1,1 \times 10^{-20}$ unità elettro-magnetiche.

Nel 1879 Crooke succedeva al Plücker ed a Hittorf nello studio, da essi iniziato fin dal 1859, delle proprietà meccaniche di quelle misteriose scariche nel vuoto, battezzate dal Goldstein col nome di « raggi catodici ». Crooke essendo riuscito ad ottenere un vuoto quasi perfetto e ad avere nel tubo un milionesimo soltanto dell'aria che esso originariamente conteneva, potè ridurre quella che egli chiamò « materia radio-attiva » in un quarto stato superiore in fluidità allo stato gazzoso, e caratterizzato da un più pronunciato

scomparire delle proprietà distintive di quello che non avvenga nel passaggio dallo stato solido allo stato liquido e dallo stato liquido allo stato gazzoso. Egli costrusse effettivamente un minuscolo mulino a vento, azionato da un torrente di elettroni, da quel vero « fluido elettrico » che noi ora conosciamo e tuttavia egli non si rese allora esatto conto della meravigliosità del fenomeno da lui provocato. La sua opinione, le sue teorie furono derise come « troppo grossolanamente materiali » e lo scopritore dovette aspettare per ben venti anni prima di vederle splendidamente confermate.

Nell'anno medesimo in cui Crooke dimostrava le sue teorie alla Società Reale, si realizzava il sogno a lungo vagheggiato di riuscire a deviare la corrente in un conduttore mediante l'azione di un campo magnetico. Poichè Crooke aveva fatto deviare con un magnete la sua « materia radio-attiva », che poteva esservi di più logico che la deviazione della stessa materia per mezzo di un magnete, mentre essa sta aprendosi la via attraverso ad una sostanza metallica? Questo risultato fu raggiunto da Hall di Baltimora, che osservò come collocando una foglia d'oro sottilissima in un campo magnetico molto energico, l'elettricità tenti di sfuggire lateralmente quando la corrente viene fatta deviare. Se questa scoperta fosse allora stata studiata con qualche attività, l'esatto significato della corrente *negativa* come corrente *vera* sarebbe stato compreso di-

ciassette anni più presto di quello che non fu. Hall stesso osserva (1):

« Se noi consideriamo la corrente elettrica « come un flusso diretto dal polo negativo al « polo positivo, i fenomeni osservati dimostrano « che due *correnti* parallele ed aventi la stessa « direzione si attraggono scambievolmente..... « Se questo fatto, collegato a quanto si disse « dianzi, abbia o non abbia influenza sulla deci- « sione del problema della effettiva direzione « della corrente elettrica è cosa forse prematura « a stabilirsi ».

Nell'anno successivo von Ettinghausen infatti affermava di poter dimostrare che la corrente procedeva dal polo negativo con la velocità di pochi millimetri per secondo. Questo risultato, come vedremo, non distava molto dalla realtà.

L'esperienza di Hall, considerata in relazione all'effetto prodotto sulla luce dal venire questa riflessa da una sostanza magnetica, scoperto da Kerr nel 1875, avrebbe senza dubbio condotto molto vicino alla moderna teoria dell'elettrone se non fosse esistita la difficoltà di distinguere tra le forze proprie all'elettricità e quelle proprie al conduttore. Nell'ignoranza di qualsiasi nozione relativa alla densità e all'inerzia delle particelle di elettricità, ogni deduzione quantitativa doveva necessariamente rimanere così indeterminata

---

(1) *American Journal of Mathematics*, vol. II, pag. 287, 1879.

come la natura dell'antico « fuoco elettrico » del Franklin.

Trovando sbarrata questa via, le ricerche nel campo dell'elettricità presero altre direzioni. Tra queste, la più proficua di risultati fu quella che si collegò all'elettro-chimica, scienza che, a partire dal Faraday, era venuta formando una propria scuola pressochè isolata dagli altri rami di scienza dell'elettricità. Hittorf, Clausius e Kohlrausch avevano seguito, con illimitata pazienza, le migrazioni dei ioni attraverso il liquido nella cellula elettrolitica, avevano scoperto la loro reciproca indipendenza e formulata la teoria della ionizzazione che raggiunse il suo punto culminante colla memorabile affermazione di Arrhenius, nel 1884, che, allo stato di completa disaggregazione, *tutte* le molecole dell'elettrolito sarebbero dissociate e libere di obbedire alle forze elettriche.

Questa scoperta, unitamente alle esperienze di Van't Hoff relative alle pressioni osmotiche, formò la base su cui Ostwald e Nernst costruirono in sèguito, nel campo chimico, l'imponente edifizio della ionizzazione.

Frattanto la teoria elettro-magnetica del Maxwell irradiatasi, per così dire, da Cambridge, attraeva a sè insensibilmente gli scienziati più eminenti dell'Europa, i quali già avevano verificata la inefficacia delle teorie matematiche di Weber, di Clausius e di Riemann basate sull'azione a distanza di due punti carichi di elettricità. J. J. Thomson, successore di Maxwell nell'Università di Cambridge, assistito dalle opinioni

del Maxwell sull'energia elettro-magnetica, mosse il suo primo passo verso la moderna teoria dell'elettricità, calcolando, nel 1881, la « quasi-inerzia » posseduta da un corpo carico di elettricità, in virtù della sua sola carica.

Ma i dubbi generati dai due ordini di idee predominanti dovevano venire dissipati con istantaneità meravigliosa da pochi e semplici esperimenti effettuati da Hertz, in Bonn, nel 1888. Egli dimostrò che la energia elettrica ha un limite finito di propagazione e che, se un corpo è carico, il campo di forza intorno ad esso non pervade istantaneamente tutto lo spazio circostante, ma impiega un certo tempo — brevissimo, ma tuttavia suscettibile di misurazione — a raggiungere un punto lontano. La velocità fu trovata eguale alla velocità della luce, cioè di 186.000 miglia al secondo.

Questa importante scoperta rovesciò completamente le teorie dell'azione istantanea a distanza e insediò su ogni cattedra di Europa e di America la teoria di Maxwell. In sèguito a questi esperimenti gli studiosi in questo campo, per il tempo di una mezza generazione, furono febbrilmente assorti nell'esame dei corpi dielettrici, facendone dei condensatori di onde elettro-magnetiche; la corrente maravigliosa di queste ricerche doveva raggiungere più tardi l'apice del suo trionfo nella telegrafia senza fili.

Nella lotta per la preeminenza del dielettrico, il semplice conduttore necessario stava in serio pericolo di essere perduto di vista del tutto. Ma la luce di una nuova alba già irradiava

da quei tubi vuoti che, per le loro mille stravaganze, erano oramai considerati come le trappole tese alla teoria e accuratamente evitate da tutti gli studiosi, esclusi pochi più imprudenti o più coraggiosi. Arthur Schuster fu il primo a scoprire nuovo orizzonte quando calcolò, col mezzo della deviazione magnetica, il rapporto fra la carica e l'inerzia possedute da quelle che egli chiamò, con vocabolo innovatore, *le particelle catodiche*. Questa proporzione risultò molto alta, indicando così che la carica deve essere molto forte o le particelle molto piccole. Tutti ritennero che in questo calcolo vi fosse qualche cosa di errato, soprattutto quando, nel 1893, Lenard riuscì a far uscire i raggi nell'atmosfera attraverso ad una « finestra » di alluminio e proclamò essere questi raggi, per la forza del loro assorbimento, composti di onde eteree. Oggidì sappiamo che Schuster era nella verità e Lenard nell'errore; ma dovettero trascorrere ben cinque anni prima che Lenard esitasse e finalmente cedesse il campo sotto un'invasione di nuove evidenze.

Verso il finire del 1895 il mondo intero fu atterrito dalla notizia che un professore di Würzburg aveva scoperto dei raggi capaci di attraversare il corpo umano dandone, per ombra, lo scheletro. Questa scoperta fatta da Röntgen mediante un tubo vuoto, mutò questo agente misterioso, dal più disprezzato, nel più universalmente popolare strumento di esperienze.

Nel secolo decimonono vi sono quattro epoche caratterizzate da avvenimenti di importanza im-

mensa nella storia della scienza della elettricità e sono gli anni 1820, 1833, 1888 e 1896. Nel 1820 le scienze gemelle dell'elettro-magnetismo e dell'elettro-dinamica sorsero con Oerstedt, Ampère, Biot e Savart. Nel 1833 Faraday le collegava alla chimica. Nel 1888 Hertz vi unì l'etere e installò a sovrana la teoria di Maxwell, e finalmente nel 1896, la teoria dell'elettrone veniva acclamata sopra tutte le altre di cui formava l'apice ed il compimento, con istantaneità quasi eguale a quella della teoria di Maxwell, ma con assai minore opposizione.

In quell'anno Zeeman, di Leyda, scoperse che lo spettro luminoso di una fiamma di sodio poteva venire modificato dall'azione di un potente elettro-magnete, le sue linee essendo duplicate se viste in una direzione e triplicate se viste in direzione diversa. Questo fenomeno, che apparve misterioso di primo acchito, trovò spiegazione completa nella teoria formulata da H. A. Lorentz sedici anni innanzi; teoria che riduce l'azione di luminosità all'effetto della esistenza di minutissimi corpuscoli in movimento di rivoluzione intorno agli atomi.

Nello stesso anno avvenne la scoperta delle radiazioni dell'uranio per opera di H. Becquerel. L'importanza di questa scoperta fu intuita nell'anno successivo in cui J. J. Thomson riuscì a determinare la proporzione della carica alla massa nelle particelle catodiche e, con sua grande meraviglia, trovò una proporzione identica a quella già enunciata per i corpuscoli di Lorentz.

Le scoperte si succedettero d'allora in poi con rapida vicenda. Rutherford estese la teoria corpuscolare all'elettricità atmosferica. I coniugi Curie scopersero il *radium* e dimostrarono che esso emette senza interruzione calore e corpuscoli carichi di elettricità. Ovunque, e talvolta nelle regioni in cui meno si supponeva, veniva scoperto di bel nuovo questo *elettrone*, cioè la stessa quantità unitaria di elettricità « negativa ». Schuster, Simon, Kaufmann, Townsend, Wilson, Riecke, Drude ed una falange di altri scienziati si affannavano ad investigarne le proprietà, ed uno dopo l'altro tutti i varî rami della scienza dell'elettricità furono assoggettati alla teoria dell'elettrone, la grande sovrana di così vasto regno. Abraham, Sommerfeld, Bucherer, Wien, Larmor, Langevin e Lodge amplificarono la teoria, tanto matematicamente quanto sperimentalmente e la conciliarono colle equazioni fondamentali di Maxwell e di Hertz. Nè l'opera può ancora dirsi compiuta. Ogni giorno apporta nuovo materiale e nuove conquiste. Una nuova esca è stata gittata nel campo delle ricerche in ogni ramo delle scienze, che si collegano all'elettricità ed un'infinità di studiosi si adopra nel far progredire le nuove concezioni fino alle loro logiche conclusioni. E quando queste cognizioni nuove siano in possesso degli ingegneri e dei praticisti si potranno fiduciosamente prevedere nuove invenzioni e nuove scoperte assai proficue di validi risultati nel campo industriale.

CAPITOLO III.

L'elettrone in riposo.

1. *Proprietà dell'elettrone.* — L'elettrone è il più piccolo corpo elettrizzato suscettibile di esistere isolatamente. La sua massa è approssimativamente di $0,61 \times 10^{-27}$ grammi. Il suo raggio è stato calcolato in 10^{-13} cm. all'incirca. La sua carica è di quell'elettricità chiamata fino ad oggi « negativa », cioè della medesima elettricità posseduta da un bastoncino di ceralacca strofinato con lana.

La proprietà fondamentale dell'elettrone che lo distingue dalla materia comune è che esso respinge un altro elettrone, invece di attrarlo, come farebbero due particelle di materia. Se un elettrone viene disposto nel vuoto ad una distanza di 1 cm. da un altro elettrone, esso lo respinge colla forza di $1,16 \times 10^{-19}$ dine, forza pressochè eguale ad un quadrilionesimo di libbra (1).

(1) La libbra inglese equivale a kg. 0,4536.

Questa forza può apparire come eccessivamente piccola ma essa è effettivamente enorme. Essa è trilioni e trilioni di volte (più precisamente 10^{43} volte) più grande della gravitazione che produce il peso dei corpi sulla superficie della terra e il moto dei corpi celesti. La immensità di questa forza può venire resa apprezzabile mediante la seguente esperienza immaginaria. Supponiamo di disporre 2 masse, per es. di piombo, M, M_1 (fig. 1) del peso di 1 gr. ciascuna, alla distanza di 1 cm. fra di loro. Esse si attireranno colla forza di $6{,}6 \times 10^{-8}$ dine, forza troppo piccola per poter venire misurata col mezzo degli strumenti conosciuti. Ma se supponiamo di disporre alla medesima distanza due masse di 1 gr. ciascuna di elettricità negativa composta di elettroni, E, E_1, esse si respingeranno colla forza di $31{,}4 \times 10^{34}$ dine, cioè 320 quatrilioni di tonnellate!

Fig. 1.

Quando anche queste due masse fossero collocate una al polo Nord e l'altra al polo Sud della terra, esse si respingerebbero ancora colla forza di 192 milioni di tonnellate, quantunque la forza di ripulsione diminuisca col quadrato delle distanze.

Questa forza sarebbe capace di impartire a ciascuna massa di un grammo di pura elettricità una velocità eguale a quella della luce, in meno

di un milionesimo di secondo se non incontrasse l'ostacolo presentato dall'inerzia dell'elettrone, che diventa infinita o pressochè infinita quando esso acquista la velocità della luce. Comunque, è ovvio che un tale esperimento rimarrà sempre puramente immaginario.

Si ottengono cifre un po' meno sorprendenti supponendo di collocare un solo elettrone alla distanza di 1 cm. da una massa di 1 gr. di pura elettricità. La forza di ripulsione è sempre quella di 194 milioni di dine; ma se noi frapponiamo tra i due corpi, come dianzi, la distanza dell'asse della terra, questa forza si riduce al valore insignificante di $1,2 \times 10^{-10}$ dine.

Per quanto sia piccola questa forza, bisogna riflettere che la massa situata ad un'estremità della sua linea di azione è stata ridotta in eguale proporzione, cosicchè l'elettrone isolato verrà proiettato con la medesima immensa velocità dell'esperienza precedente. Esso dovrebbe essere allontanato sino alla distanza che separa il sole dalla terra prima di poter assumere un'accelerazione di un valore ordinario, ed anche a tale immenza distanza ($= 1,53 \times 10^{13}$ cm.), la forza esercitata da 1 gr. di pura elettricità della terra su ogni elettrone libero del sole sarebbe sufficiente a impartire a ciascuno di essi, in 20 secondi, una velocità uguale a quella della luce.

Dalle considerazioni sopra esposte risulta evidente che in tutti i fenomenti elettrici comuni noi ci troviamo in presenza di una quantità assai

piccola di elettricità libera. Tentiamo ora di formarci un'idea di questa quantità.

2. *Elettroni e materia.* — Dalle leggi dell'elettrolisi noi deduciamo che ogni atomo di materia è suscettibile di aderire temporaneamente a una determinata quantità di elettricità, quantità esattamente proporzionale alla sua valenza chimica, ma affatto indipendente dalla natura dell'elemento. Così nell'elettrolisi dell'acido cloridrico ogni atomo di cloro porta all'anodo una determinata quantità di elettricità negativa, quantità che noi possiamo misurare con un galvanometro. Siccome però conosciamo il peso del cloro svolto ed il peso dell'atomo di cloro noi possiamo trovare, col mezzo di un semplice calcolo, che la quantità di elettricità trasportata da ogni atomo è, per quanto ci è dato conoscere, appunto un elettrone. Se ne deduce che ogni atomo di cloro nella cellula elettrolitica possiede un elettrone associato ad essa in qualche modo, ma in modo tale da poterne venire prontamente separato quando venga portato sotto la sfera di azione di una forza determinata. L'atomo di cloro allo stato ordinario non porta con sè il proprio elettrone, ed è quindi scarico.

Altri elementi — come per es. l'idrogeno ed i metalli — sono pure scarichi allo stato normale. Ciascun atomo contiene una quantità di elettroni ma l'azione elettrica di questi è compensata da una forza speciale nell'interno dell'atomo stesso, forza che, in mancanza di una locuzione migliore, chiameremo « l'elettricità po-

sitiva »; ma ciascun atomo quando venga collocato in una cellula elettrolitica e assogettato alla forza elettrica è suscettibile di perdere temporaneamente un elettrone — o due elettroni se l'elemento è bivalente — e quindi a diventare caricato « positivamente ».

Possiamo quindi ragionevolmente supporre che in ogni massa scarica di un metallo bivalente — per es. di una palla di rame — è contenuto un numero di elettroni per lo meno doppio del numero degli atomi. E poichè l'unione fra questi atomi e questi elettroni non è rigida, è lecito supporre che questa proporzione sia suscettibile di variazioni. Quando gli elettroni eccedono il numero usuale allora troviamo che la palla è carica negativamente, quando invece vi è una deficienza nel numero degli elettroni la palla è caricata positivamente. Dai dati sopra esposti relativi alle forze immense con cui gli elettroni agiscono gli uni sopra gli altri, non è difficile concepire cause adeguate per tali effetti.

Quando le palle che abbiamo dianzi supposto sono cariche, gli elettroni o gli atomi caricati positivamente, malgrado la loro reciproca ripulsione, non vengono proiettati fuori del metallo nell'atmosfera circostante. Essi percorrono il metallo con minimo attrito ma incontrano una resistenza assai forte al limite fra il metallo e l'aria e quindi assumono una posizione di equilibrio alla superficie del corpo stesso e vi rimangono lasciando scarico l'interno del metallo.

Ora supponiamo che due palline di rame A e B

siano appese lato a lato mediante fili lunghi 1 m. (fig. 2), supponiamo che esse siano cariche negativamente cosicchè si respingano rimanendo ad una distanza di 1 cm. È facile quindi dimostrare che la forza agente fra esse è $^1/_{200}$ del loro peso. Se i raggi delle pallottoline sono ciascuno di 1 mm. quale sarà il numero degli elettroni liberi sufficiente a produrre la ripulsione necessaria? Il calcolo può venire eseguito con facilità.

Volume di ciascuna palla	$4{,}2 \times 10^{-3}$	cm.
Peso (densità 8,93) . .	$3{,}75 \times 10^{-2}$	gr.
Forza di ripulsione . .	$1{,}87 \times 10^{-4}$	gr.
	$= 0{,}184$	dine.

A B

Fig. 2.

Questo è il valore della forza che sarebbe esercitata da 1260 milioni di elettroni su un pari numero di elettroni collocati a distanza di 1 cm. nell'aria. Ed è questo quindi il numero di elettroni liberi in ciascuna palla.

Questo valore appare eccessivamente grande, ma vedremo presto come esso non rappresenti che una frazione insignificante della quantità totale degli elettroni presenti.

Dai calcoli più degni di fede risulta che il numero totale di atomi contenuti in un centimetro cubo di rame solido è di circa 1 quadrillione o $1{,}23 \times 10^{24}$. Ora siccome ciascuna delle nostre palline ha un volume di $4{,}2 \times 10^{-3}$ cm^3, essa conterrà $(1{,}23 \times 10^{-24})$ $(4{,}2 \times 10^{-3})$ atomi ed una quantità doppia di elettroni separabili

cioè 10.300 trilioni. La proporzione degli elettroni separabili al numero rimanente di elettroni è di

$$\frac{10.300 \text{ trilioni}}{1.260 \text{ milioni}} = 8 \text{ bilioni}$$

Perciò se, per ogni otto bilioni di elettroni combinati nel rame, aggiungiamo un elettrone isolato, otteniamo la forza necessaria di ripulsione. E poichè un atomo neutro privato di un elettrone respinge un atomo simile colla stessa forza esistente fra due elettroni, noi potremmo produrre ancora la medesima forza di ripulsione asportando un elettrone da ciascun gruppo di otto milioni di elettroni contenuti in ogni palla: esse quindi si respingerebbero a vicenda in virtù delle loro cariche positive.

A cagione della grande intensità delle forze agenti è praticamente impossibile di allontanare più di un bilionesimo all'incirca del numero totale di elettroni separabili, o di aggiungerne in proporzione maggiore a quelli già esistenti. Ciò spiega perchè uno stesso corpo carico o scarico di elettricità non presenti variazione sensibile nel suo peso. Se però, per azione di una potenza speciale, si potessero allontanare continuamente da un corpo gli elettroni o atomi positivi, questo corpo subirebbe una graduale disaggregazione. Questo è quanto avviene al catodo in un tubo vuoto ed al carbone positivo della lampada ad arco.

Siamo ora in grado di formulare con esat-

tezza alquanto più grande le leggi che governano le forze agenti fra gli elettroni e gli atomi caricati positivamente: *a*) Ciascun elettrone posto alla distanza di 1 cm. da un altro elettrone lo respinge con la forza di $1{,}16 \times 10^{-19}$ dine; *b*) Ciascun atomo allo stato neutro, da cui venga asportato un elettrone, respinge un atomo simile posto alla distanza di 1 cm. colla stessa forza, cioè di $1{,}16 \times 10^{-19}$ dine. E, d'altra parte, *c*) ciascun elettrone attira ciascun atomo neutro da cui venne asportato un elettrone (quando venga collocato ad una distanza di 1 cm. da esso) colla stessa forza, cioè $1{,}16 \times 10^{-19}$ dine, o, se sono stati asportati dall'atomo, due, tre, ecc. elettroni con una forza che supera di due, tre, ecc. volte il valore succitato; *d*) tutte queste forze variano in proporzione inversa al quadrato delle distanze, a meno che la distanza non sia così piccola da diventare paragonabile alla dimensione di un atomo (cioè 10^{-8} cm) (1).

(1) Secondo la teoria della gravitazione degli elettroni (V. SUTHERLAND, *Phil. Mag.*, dic. 1904) l'attrazione fra due cariche opposte è più grande della ripulsione di due cariche simili nella proporzione di $(1 + 10^{-43}) : 1$, risultandone così una forza di attrazione molto piccola. Nella teoria dell'elettrone l'attrazione e la ripulsione sono, come la forza di gravitazione, indipendenti dal modo in cui è occupato lo spazio interposto. Sostanze prive di elettroni non avrebbero effetto elettrico alcuno, e potrebbero venire teoricamente sostituite dall'etere puro nella risoluzione di tutti i problemi di elettricità. Gli effetti attribuiti finora alla " capacità specifica d'in-

Dalla legge di attrazione si deduce che un elettrone non può venire asportato da un atomo neutro se non dall'azione di una forza assai grande in relazione con la massa di esso. L'attrazione fra gli elettroni è la più grande forza coesiva che si conosca, e se si vuole spiegare con essa la forza di coesione si vedrà come a superarla occorra per lo meno opporvi la forza necessaria a spezzare il metallo o le altre sostanze. Supponendo che la legge di attrazione valga immutata anche per dimensioni molecolari minime come quelle di 10^{-8} cm. noi potremo calcolare la forza agente fra un elettrone e l'atomo che esso sta per abbandonare. Basta perciò dividere l'attrazione agente alla distanza di 1 cm. per il quadrato della distanza, cioè 10^{-16}. Il valore della forza sarà quindi di

$$\frac{1{,}16 \times 10^{-19}}{10^{-16}} \text{ ossia } 1{,}16 \times 10^{-3} \text{ dine.}$$

Questa forza, agente su un elettrone per lo spazio di un secondo, gli impartirebbe una velocità misurata dal rapporto della forza alla massa, cioè

$$\frac{1{,}16 \times 10^{-3}}{0{,}61 \times 10^{-27}} = 19 \times 10^{24} \frac{\text{cm.}}{\text{sec.}}$$

Questo risultato dimostra che ciascun elettrone compreso nel raggio d'azione molecolare

duzione „ o costante dielettrica del mezzo dovrebbero attribuirsi alle cariche che sono contenute nello stesso mezzo.

verrebbe istantaneamente imprigionato ed assorbito da un atomo caricato positivamente. Poichè il numero degli elettroni liberi nell'universo è per necessità esattamente eguale al numero degli atomi carichi positivamente, o meglio, alla somma delle loro valenze, è difficile concepire come un elettrone possa mai trovarsi completamente isolato. Se tutti gli elettroni fossero assorbiti, cosa che avverrà un giorno molto probabilmente, non esisterebbe azione elettrica di alcuna specie, e forse nemmeno azione chimica, e allora queste due scienze diventerebbero superflue.

Per comprendere come ciò non sia ancora avvenuto addurremo un esempio su vasta scala. La forza di attrazione esercitata dal sole sulla terra è di circa quattro trilioni di tonnellate. Tuttavia la terra non cade sul sole per causa della forza centrifuga generata dalla sua velocità di movimento. Vediamo ora quale è la velocità necessaria perchè l'elettrone non possa venire assorbito dall'atomo. La forza da controbilanciarsi è, come abbiamo visto, $1,16 \times 10^{-3}$ dine. La forza centrifuga di un corpo di massa m, descrivente un'orbita di raggio R con velocità v, è

$$\frac{mv^2}{R}$$

Sostituendo per m la massa dell'elettrone ($0,61 \times 10^{-27}$ gr.) e per R la sua distanza dal centro dell'atomo (10^{-8} cm.), si ottiene

$$1,16 \times 10^{-3} = \frac{0,61 \times 10^{-27} \times v^2}{10^{-8}}$$

da cui $v = \pm 1,38 \times 10^8$ cm. al secondo. Questa velocità orbitale dell'elettrone, quantunque grande, è tuttavia ammissibile se si riflette che essa è sempre inferiore a $^1/_{200}$ della velocità della luce (la più grande velocità raggiungibile). Conoscendo la lunghezza dell'orbita possiamo calcolare il numero di rivoluzioni fatte in un secondo, che è di $2,2 \times 10^{15}$ ossia 2200 bilioni. Come vedremo in appresso, l'elettrone in rivoluzione lancia nello spazio delle onde eteree con la velocità della luce (3×10^{10} cm. al secondo). La lunghezza di tali onde sarà quindi di

$$\frac{3 \times 10^{10}}{2,2 \times 10^{15}} \text{ o } 136 \times 10^{-6} \text{ mm.}$$

Questa lunghezza di onda è appena un terzo circa di quella della più breve onda luminosa visibile. Le onde emesse dall'elettrone sono quindi onde di luce ultra-violetta. Ora, per la legge di Keplero, possiamo facilmente calcolare quale distanza fra l'elettrone e l'atomo corrisponda a tale lunghezza d'onda. Infatti, per la citata legge, i quadrati dei periodi di rivoluzione sono direttamente proporzionali ai cubi delle distanze. Quindi se noi mutiamo la distanza da 10^{-8} cm. a 10^{-7} cm., noi aumentiamo di dieci volte il valore della distanza e di mille volte il suo cubo. La lunghezza d'onda verrà quindi aumentata nel rapporto di $\sqrt{1000} : \sqrt{1}$ cioè 31,6 volte. Cioè la lunghezza d'onda della luce emessa dall'elettrone nella nuova sua orbita risulta di 4300×10^{-6} mm.

Questa luce è ancora invisibile avendo una lunghezza d'onda circa sei volte superiore a quella della estrema luce rossa dello spettro. Essa è quindi una luce « infra-rossa ».

Un valore intermedio ai due valori esperimentati darà una luce visibile. La luce gialla del sodio richiederebbe una distanza di

$$2{,}66 \times 10^{-8} \text{ cm.}$$

fra l'elettrone e l'atomo.

Naturalmente gli elettroni di un metallo allo stato solido posseggono delle velocità assai diverse, quindi essi dànno uno spettro continuo quando la velocità media sia abbastanza forte, cioè quando il corpo sia sufficientemente riscaldato; altrimenti i suoi elettroni irradieranno delle onde calorifiche di grande lunghezza ma di bassa energia, in conformità della legge degli scambi.

Le considerazioni sopra esposte dimostrano che noi dobbiamo ritenere il metallo come costituito da un aggregato di atomi a dolce sfregamento, per modo che gli elettroni, durante le loro vibrazioni costanti dovute ad una determinata temperatura, si avvicendano liberamente fra essi perdendo per l'attrito una quantità relativamente piccola di energia nel loro passaggio da un atomo all'altro. Si è a cagione di questa proprietà che i metalli vengono detti « buoni conduttori dell'elettricità ».

In altri corpi, come vetro, ebanite, quarzo, olio, guttaperca e porcellana, vi sono soltanto

pochi elettroni abbastanza liberi di sè da poter passare da un atomo all'altro. Se questi corpi circondano un metallo essi impediscono ai suoi elettroni di sfuggirne anche sotto l'azione di una forza notevole. Perciò tali corpi sono detti « isolatori ».

Che in essi esista il giusto rapporto tra il numero degli elettroni e quello degli atomi è dimostrato dalla tensione a cui vengono assoggettati dalle forze elettriche o dall'influenza da essi esercitata sulla luce che li attraversa.

Il vuoto, che non offre resistenza al passaggio di un elettrone, è, in questo senso, un perfetto conduttore; ma non nel senso ammesso nella scienza dell'elettricità. Per poter condurre l'elettricità un corpo deve provvedere i mezzi di trasporto necessari affinchè non avvenga discontinuità. Questi mezzi di trasporto sono gli elettroni e gli atomi positivi con o senza aderenza di materie estranee. Il vuoto privo di questo mezzo di trasporto è quindi un *perfetto isolatore*. Per condurre bene l'elettricità un corpo deve contenere delle cariche elettriche libere ed offrire al cammino di esse nella direzione della forza elettrica una minima resistenza. Le accennate cariche elettriche libere sono i singoli elettroni o porzioni di materia neutra associate a cariche positive o negative. Buon conduttore è un corpo che contiene un gran numero di cariche elettriche libere (dette « ioni ») ed offre una resistenza minima al loro passaggio.

La conduttività di una sostanza qualsiasi si

definisce quindi, secondo la teoria degli elettroni, come il numero di ioni contenuto nella unità di volume moltiplicato per la velocità costante da essi assunta sotto l'influenza dell'unità di forza detta motrice. In conformità di questa definizione l'etere deve essere considerato come un perfetto isolatore.

3. *Distribuzione delle cariche libere.* — Abbiamo detto che i metalli sono costituiti da un gran numero di atomi (circa un quadrilione per ogni centimetro cubo) e da un numero pressochè doppio di elettroni in rapido movimento e che le onde elettriche che essi emettono in forza di tale movimento costituiscono il suo calore d'irradiazione. Tutti i corpi irradiano calore a meno che essi non si trovino alla temperatura dello zero assoluto (— 273° C.) e questa irradiazione avviene in forza del calore che ciascun corpo riceve dalle cose circostanti.

In un isolatore gli elettroni non sono suscettibili di spostarsi dalla sfera degli atomi a cui essi aderiscono. Una forza elettrica può spostarli lievemente ma quando questa forza viene a cessare gli elettroni ritornano più o meno rapidamente alla loro posizione originaria di equilibrio.

In un corpo conduttore le cose avvengono in modo assai diverso. Il movimento tanto degli atomi quanto degli elettroni è assai più rapido, e gli elettroni si muovono costantemente liberi, urtando gli atomi e urtandosi fra loro, aggirandosi intorno agli atomi, arrestandosi nella col-

lisione con gli atomi stessi, riprendendo la loro corsa dopo essere stati liberati della momentanea prigionia per il succedersi di urti contro altri atomi o altri elettroni. Questa differenza fra i corpi dielettrici e i conduttori non è ancora spiegata in modo completo, ma varie circostanze concordano per illuminare questo quesito. Anzitutto, i corpi conduttori sono ordinariamente più pesanti dei corpi dielettrici. I loro atomi sono quindi o più pesanti o più compatti, cosicchè ciascun elettrone è rivendicato da un numero maggiore di atomi circostanti. Secondariamente i corpi conduttori, per lo più metalli, hanno un calore specifico assai basso, il che significa che una quantità assai piccola di calore è sufficiente per attribuire ad essi una velocità molecolare corrispondente ad una data temperatura. Essi irradiano e assorbono quindi assai rapidamente le onde calorifiche, e lo « scambio » sopra accennato avviene con maggior vivacità nei corpi conduttori che nei corpi dielettrici.

Per ora ci limitiamo a studiare i corpi conduttori, e più particolarmente i metalli e fra essi il rame come conduttore eccellente.

Per questo metallo si è calcolato approssimativamente che ciascun elettrone si combina con un atomo e se ne separa circa cento milioni di volte al secondo. Per ogni periodo di 5000 secondi in cui l'elettrone è trattenuto dall'influenza di un atomo, esso erra libero un solo secondo. Ed è appunto a questi elettroni erranti che sono dovuti tutti i fenomeni della conduttività. Pos-

siamo supporre che essi costituiscano $^1/_{5000}$ del numero totale degli elettroni del rame, ma questo valore è molto incerto e variabile colla temperatura e colla qualità del metallo. Gli elettroni erranti non costituiscono una carica elettrica poichè essi sono controbilanciati da un pari numero di atomi caricati positivamente e contenuti nel conduttore.

Che avverrà quando una massa di elettricità libera, simile a quella sopracitata, ma contenente un numero minore di elettroni, verrà posta in vicinanza di una massa di metallo contenente non un eccesso, ma nemmeno un difetto di elettroni?

È ovvio che gli elettroni liberi nell'interno della massa metallica verranno respinti e cercheranno di allontanarsi in direzione opposta, per quanto sarà loro possibile, mentre gli atomi carichi lasciati indietro dagli elettroni fuggenti si affolleranno verso la massa elettrica. Raggiunto l'equilibrio, il punto del conduttore situato più vicino alla regione degli elettroni sarà caricato positivamente mentre che il punto del conduttore più lontano dagli elettroni si troverà carico negativamente, e fra questi punti estremi si troverà una quantità più o meno grande di punti intermedi con più o meno rapida graduazione, a seconda della forma del conduttore. Questo è il noto fenomeno della « carica per influenza », scoperto 150 anni or sono da Aepinus in Pietroburgo.

Per ottenere qualche dato più pratico sarà

bene che ci formiamo un'idea numerica di questa carica prendendo naturalmente in esame una quantità di elettricità superiore ad un elettrone isolato. Il modo di procedere più semplice è quello di prendere come unità un numero assai grande di elettroni, per es. un multiplo di dieci. Senonchè ci arresta la difficoltà dell' incertezza riguardo la precisa carica di ciascun elettrone. J. J. Thomson, nei suoi calcoli più recenti, ottenne per essa il valore di $3{,}4 \times 10^{-10}$ « unità elettrostatiche » e questo è il valore che noi adottammo nei nostri calcoli. Nelle misurazioni pratiche tuttavia l'unità è definita come quella quantità di elettricità che, collocata nel vuoto alla distanza di 1 cm. da una eguale quantità di elettricità dello stesso segno, la respinge colla forza di una dina ($= {}^1/_{981}$ di gramma) (1).

Ora siccome ciascun elettrone o ciascun atomo positivo ne respinge uno simile, alla distanza di 1 cm., con una forza di $1{,}16 \times 10^{-19}$ dine (2) e la forza varia col variare delle due masse, la forza ripulsiva di 1 dina sarebbe prodotta da $2{,}93 \times 10^{9}$, cioè 2930 milioni di elettroni.

---

(1) A Roma il peso di un grammo equivale a 980,386 dine. Si può ritenere che la dina sia la 980 esima parte del peso di 1 cm³ d'acqua in quei paesi ove $g = 980$. (V. Ròiti, *Elementi di fisica*, 4ª ed., p. 83), vol. I. (N. d. Tr.).

(2) La dina è la forza che, agendo per un secondo su di una massa di un gramma produce in esso una velocità di 1 cm. al secondo. Essa è la 981 esima parte di un gramma.

Questo valore approssimativo di 2930 milioni di elettroni è ciò che si chiama « l'unità di misura elettrostatica », essendo stata ricavata da misure di forza elettrostatica.

Tenendo presente lo scopo di quest'opera, nella quale il lettore non deve mai dimenticare che l'elettricità ha una struttura atomica, *noi preferiamo chiamare questo valore di 2930 milioni di elettroni* (cioè l'unità elettrostatica di elettricità negativa) *una compagnia di elettroni*, e lo stesso numero risultante dalla riunione di atomi carichi (o di altri oggetti che anche non siano atomi) una *compagnia* di atomi o di speciali oggetti. Questa cifra di 2930 milioni è presentemente accettata come esatta ma potrà forse venire modificata leggermente nel futuro.

Possiamo ora riassumere le leggi che governano la ripulsione, nel modo seguente:

a) Una compagnia di elettroni respinge un'altra compagnia di elettroni posta alla distanza di 1 cm. colla forza di 1 dina.

b) Una compagnia di atomi neutri (atomi privati di un elettrone) respinge una compagnia simile di atomi, alla distanza di 1 cm. colla forza di 1 dina.

c) Una compagnia di elettroni attira una compagnia di atomi neutri (atomi privi ciascuno di un elettrone), colla forza di 1 dina.

d) Queste forze di ripulsione e di attrazione sono inversamente proporzionali al quadrato delle distanze (sempre quando si tratti di

distanze grandi relativamente alla distanza che separa i singoli elettroni o gli atomi).

4. *Energia di posizione. — Potenziale.* — Quando si verifica un movimento vincendo una resistenza si compie un lavoro. Se il movimento è costante la forza che lo produce è eguale alla forza che lo ostacola ed il lavoro è misurato dallo spazio percorso. Se la resistenza incontrata nel percorrere lo spazio interposto tra due punti determinati è dovuta all'attrito di materie estranee, la quantità di lavoro compiuta nel percorrere lo spazio tra due punti dipende dalla specie del cammino, allo stesso modo in cui si compie una fatica più grande nel percorrere lo spazio che separa due città quando la via tra esse è in cattivo stato. Se però una strada è due volte migliore di un'altra ma quest'ultima è due volte più breve, il lavoro totale è il medesimo. La bontà di una strada si misura dalla minor resistenza che essa offre al procedere del veicolo ed il lavoro compiuto si misura facendo il prodotto dello spazio per la resistenza, cosicchè se il lavoro compiuto nel percorrere due vie diverse risulta lo stesso se ne deduce che la loro lunghezza è inversamente proporzionale alla loro « asperità » (resistenza).

Se la resistenza è dovuta non a materie estranee ma alla ripulsione di un corpo lontano, il lavoro compiuto dipende semplicemente dalla distanza del corpo stesso ed è interamente indipendente dallo spazio percorso. L'ignoranza di

questa verità ha illuso molti dei ricercatori del moto perpetuo.

Se il corpo lontano animato da forza di ripulsione è un punto od una sfera molto piccola, e intorno ad essa si trova una serie di altre sfere concentriche, il lavoro da eseguirsi sul corpo respinto sarà quello di fargli attraversare successivamente le varie sfere concentriche; ma non sarà necessario compiere alcun lavoro per spostarlo lungo la superficie di ciascuna sfera poichè tutti i punti di questa superficie sono equidistanti dal corpo respingente. Nel passaggio da una sfera alla successiva un certo lavoro deve venire effettuato. Quando il corpo respinto ritorna alla sua sfera tale somma di lavoro viene restituita e può venire impiegata a vincere qualche altra resistenza. Un corpo che sia capace di compiere un lavoro a causa della sua speciale posizione dicesi munito di « energia potenziale » o, in altre parole, di una potenzialità di lavoro. È ovvio che tale energia potenziale è tanto più grande quanto più il corpo respinto è vicino al corpo respingitore. Ma come si può misurare l'ammontare totale della sua energia potenziale? Il problema presenta una difficoltà assai facile a intuirsi: la forza ripulsiva agisce in un raggio infinito, quindi l'energia potenziale parrebbe dover essere infinita, cioè il corpo respinto sarebbe capace di eseguire un lavoro per un tempo infinito poichè, per quanto grande sia la distanza a cui esso venne respinto, sussiste tuttavia ancora un resto di forza ripulsiva disposto ad agire sopra

di esso dandogli l'impulso per l'esecuzione di un lavoro.

Questo argomento, per quanto plausibile, è errato perchè la somma di un numero infinito di quantità infinitesimali non è infinita ma è limitata. E questa affermazione può venire dimostrata mediante alcuni esempi comuni. Uno fra questi è l'antico dilemma greco di Achille e della tartaruga. Una tartaruga si trova un miglio più innanzi di Achille quando questi parte per raggiungerla. Achille corre con velocità 100 volte superiore a quella della tartaruga cosicchè quando egli ha percorso un miglio la tartaruga non dista più da lui che $^1/_{100}$ di miglio e quando Achille avrà percorso questa distanza essa si troverà di $^1/_{10000}$ di miglio innanzi a lui e così via, cosicchè Achille si avvicinerebbe sempre più alla tartaruga senza mai raggiungerla. La soluzione è che la somma delle quantità:

$$1 + \frac{1}{100} + \frac{1}{10.000} + \frac{1}{10.000.000} \text{ ecc.}$$

è un numero finito, come risulta evidente scrivendolo in forma di frazione decimale:

$$1{,}0101010101\ldots\ldots$$

numero che è certamente inferiore a 1,0102 ed è esattamente eguale a $^{100}/_{99}$. La tartaruga avrà quindi percorso $^1/_{99}$ di miglio quando sarà raggiunta da Achille.

Altro esempio è il seguente: Supponete di trovarvi su un ponte attraversato da due binari paralleli; essi vi appariranno come riuniti al li-

mite dell'orizzonte. Se voi vi collocate entro uno dei binari, le rotaie, se si trovano su una linea retta per un piano *infinito*, si incontreranno in un punto a livello dei vostri occhi. Se un treno si allontana sull'altro binario, quanto più aumenterà la distanza tanto più esso sembrerà approssimarsi al primo binario senza però mai attraversarlo poichè abbiamo supposto che le rotaie siano parallele. Se quindi il treno si allontanerà per un tempo infinito esso si avvicinerà sempre più a quel dato punto dell'orizzonte senza mai confondersi con esso. Da questo esempio vediamo come quantità infinite e quantità infinitesimali possano sovente combinarsi e formare quantità finite soggette alle ordinarie leggi aritmetiche. Questo risultato può servire ad incoraggiarci ad affrontare il problema dell'energia totale potenziale di un corpo ripulso.

A questo scopo supponiamo di circondare il corpo ripulso E con una serie di sfere concentriche (fig. 3). Le superfici di queste sfere vengono indicate col nome di « superfici equipotenziali » poichè il corpo ripulso ha la stessa energia potenziale quando si trova collocato sulla stessa superficie. Queste sfere non vengono da noi costruite a caso, ma in modo tale che sia necessario compiere lo stesso lavoro passando da una sfera a quella successiva. Poichè la forza di ripulsione è inversamente proporzionale al quadrato del raggio, la distanza fra due sfere successive sarà direttamente proporzionale al quadrato del raggio medio. Cioè ad una distanza

doppia le superfici equipotenziali saranno come quadruplicate.

Supponiamo ora di collocare un piccolo corpo negativamente elettrizzato, per es. una « compagnia » (una unità elettrostatica) di elettroni, nel punto E ed un corpo simile nel punto P. Il quesito da risolvere è quello di trovare l'energia totale potenziale del corpo in P, cioè il lavoro compiuto

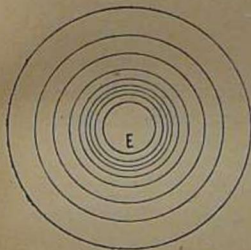
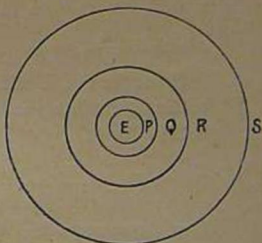



Fig. 3. Fig. 4.

per portarlo in P da una distanza infinita, o il lavoro che esso potrebbe compiere nell'allontanarsi fino ad una distanza infinita. Per semplificare il problema tracciamo una sfera sulla cui superficie si trovi il punto P, ed altre sfere con raggio due, quattro, otto, ecc., volte più grande passanti per i punti Q, R, S, ecc. (fig. 4). Nel passare dal punto P al punto Q la « compagnia » degli elettroni attraversa un certo numero di superfici equipotenziali e questo numero è la misura del lavoro compiuto sul corpo. Indichiamo

questo lavoro con W. Nel passare dal punto Q al punto R avviene lo stesso fatto, senonchè la distanza fra le superfici successive essendo quadrupla della distanza antecedentemente considerata, il lavoro eseguito starà al precedente nel rapporto di $^1/_4$. Però siccome la distanza attraversata è doppia, il lavoro effettivo eseguito fra il punto Q ed il punto R sarà metà del lavoro eseguito fra P e Q. Nel viaggio successivo il lavoro sarà di $\frac{W}{4}$ anzichè di $\frac{W}{2}$ e più oltre di $\frac{W}{8}$.

Proseguendo il calcolo fino all'infinito il lavoro totale compiuto (= l'energia potenziale totale) è di

$$W + \frac{W}{2} + \frac{W}{4} + \frac{W}{8} + \frac{W}{16} \ldots\ldots$$

Ora, la somma di

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} \ldots\ldots$$

fino all'infinito è, come ognuno può facilmente verificare, eguale a 2.

Il lavoro totale è quindi uguale a 2 W, e questo lavoro rappresenta l'energia potenziale della compagnia di elettroni nel punto P.

L'energia potenziale in Q sarà di

$$2W - W = W,$$

in R di

$$W - \frac{W}{2} = \frac{1}{2} W.$$

in S di

$$\frac{W}{2} - \frac{W}{4} = \frac{1}{4} W.$$

In altre parole, le energie potenziali nei punti P, Q, R, S, sono come

$$2 : 1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$$

ovvero

$$1 : \frac{1}{2} : \frac{1}{4} : \frac{1}{8}.$$

Le distanze essendo come

$$1 : 2 : 4 : 8$$

troviamo che *l'energia potenziale in un punto è inversamente proporzionale alla distanza del punto stesso del centro del corpo ripulso.*

Ora per ottenere il valore effettivo dell'energia in unità di peso o altre unità di lavoro basterà determinare il lavoro compiuto fra i punti P e Q e raddoppiarlo. Se la energia in P è uguale ad 1 dina, la forza in Q sara di $^1/_4$ di dina. Se la distanza fra P e Q è di 1 cm., il lavoro compiuto sarà compreso fra

$$1 \text{ cm.} \times 1 \text{ dina e } 1 \text{ cm.} \times \frac{1}{4} \text{ di dina.}$$

Il lavoro necessario per esercitare la forza di 1 dina o per contrastarla per lo spazio di 1 cm. è chiamata « 1 ergon » (1), cosicchè il lavoro com-

(1) L'ergon è una quantità piccolissima: basta infatti sollevare un milligrammo all'altezza di 1 cm. per ese-

piuto fra P e Q è compreso all'incirca fra 1 erg. e $^1/_4$ erg. Se si costruiscono molte superfici equipotenziali fra P e Q secondo la regola sopra esposta, e si eseguisce il calcolo relativo si trova che il lavoro effettivo è esattamente eguale a $^1/_2$ erg. Cosicchè l'energia potenziale totale è eguale a $2 \times {}^1/_2$ erg $=$ 1 erg.

E poichè EP $=$ 1 cm. e la forza in P è eguale ad 1 dina, E deve essere, per definizione, appunto una compagnia di elettroni.

Abbiamo così ottenuto i seguenti risultati importanti e fondamentali: Il lavoro totale necessario per trasportare una unità elettrostatica (una « compagnia ») dall'infinito ad una distanza minore di 1 cm. da un'unità simile ed eguale è 1 erg., e il lavoro varia in proporzione inversa della distanza.

Se aumentiamo la quantità del corpo repellente il lavoro varia direttamente col variare dell'elettricità poichè gli effetti delle due « compagnie » di elettroni si sommano semplicemente. Ma se raddoppiamo e il corpo repellente e quello ripulso, il lavoro risulta quadruplicato. Mantenendo il corpo ripulso sempre eguale ad un'unità o « compagnia » di elettroni, si ottiene un valore conveniente per l'energia potenziale che il corpo repellente può impartire. Il lavoro esercitato su di una compagnia o unità nel trasportarla da una distanza infinita al

---

guire 0,98 di ergon o 980 erg $=$ 0,000.01 di chilogrammetro (V. Roiti, Op. cit., p. 105, vol. I).

(N. d. Tr.).

punto P in opposizione alla forza repulsiva esercitata da E è chiamato la funzione potenziale o semplicemente il *potenziale* nel punto P dovuto all'influenza di E. I seguenti teoremi riescono quindi evidenti di per sè:

a) Tutti i punti di una superficie equipotenziale si trovano ad uno stesso potenziale;

b) Una carica elettrica tende sempre a spostarsi da un punto di potenziale più elevato ad uno di potenziale più basso;

c) L'energia in un punto qualsiasi è proporzionale al rapporto di scambio del potenziale lungo le linee di forza, ossia al confondersi delle superfici equipotenziali;

d) Tutti i punti della superficie di un conduttore sono allo stesso potenziale. Perchè se così non fosse l'elettricità passerebbe dai punti a potenziale più elevato a quelli a potenziale più basso fino a tanto che non sia raggiunto l'equilibrio.

Abbiamo supposto il corpo repellente E in forma di una sfera molto piccola. Però il calcolo da noi eseguito vale anche per una sfera di dimensioni abbastanza grandi purchè gli elettroni o atomi positivi siano distribuiti alla sua superficie, poichè essi agiscono verso l'esterno come se tutti fossero concentrati nel centro della sfera. Possiamo quindi trovare il potenziale alla superficie della sfera, che è di $\frac{E}{R}$ in cui E è il numero di unità o « compagnie » e R il raggio in centimetri. Possiamo ora calcolare il lavoro

totale necessario a formare il corpo repellente. Eseguiamo il calcolo unità per unità. Per portare le due prime « compagnie » entro R centimetri di distanza fra loro occorre un lavoro di $\frac{1}{R}$ di dina. L'unità successiva richiederà un lavoro doppio cioè $\frac{2}{R}$ di dina e l'ultima unità il lavoro di $\frac{E-1}{R}$ di dina. Possiamo ottenere la somma di questi fattori calcolando la media delle cariche durante la loro formazione. Questa media è di

$$\frac{(E-1)+1}{2} = \frac{E}{2}.$$

Il potenziale medio durante la formazione era quindi di $\frac{E}{2R}$, e poichè il numero totale delle unità da portarsi a quel potenziale era E, l'energia totale consumata in tale procedimento fu di

$$E \times \frac{E}{2R} = \frac{1}{2}\frac{E^2}{R}.$$

Ovvero chiamando V il potenziale terminale $\frac{E}{R}$, l'energia totale consumata sarà uguale a $\frac{1}{2}$ E V.

Tornando ora al nostro gramma di elettricità pura (pag. 26), il quale, come abbiamo visto, può produrre risultati così sorprendenti anche alla distanza che separa la terra dal sole, possiamo ora calcolare l'energia necessaria a comporlo.

Il gramma di elettricità pura consiste, come abbiamo visto, di un mezzo trilione ($5,6 \times 10^{17}$)

di compagnie. Questo è il valore di E. Supponiamo questa quantità concentrata in una sfera di 1 cm., cosicchè R sarà eguale a 1. L'energia richiesta a comporlo sarà quindi

$$\frac{1}{2}\frac{E^2}{R}\text{ ergon} = \frac{1}{2}\frac{(5{,}6\times 10^{17})^2}{1} = 16\times 10^{34}\text{ ergon}$$

equivalente a un bilione di HP in azione per 680.000 anni. La stessa quantità di energia sarebbe necessaria, com'è ovvio, per formare lo stesso numero di atomi carichi; ma se si volesse formare un solo gramma di atomi carichi, il numero delle compagnie sarebbe inferiore proporzionalmente al peso degli atomi. Ora poichè gli atomi pesano da 1000 a 200.000 volte più dell'elettrone, il numero delle compagnie per gramma sarà da 1000 a 200.000 volte minore. Quindi l'energia necessaria a formare un gramma di sostanza composta esclusivamente di atomi carichi positivamente è compresa fra 16×10^{28} ergon e 4×10^{24} ergon, valore tuttavia enorme.

Il potenziale dovuto ad un piccolo corpo carico in un punto esterno ad esso è misurato semplicemente dal quoziente della sua carica divisa per la distanza di quel punto dal centro del corpo e perciò l'energia potenziale o, brevemente, il potenziale di qualsiasi altro corpo carico collocato in quel punto sarà dato dal prodotto della sua carica per il potenziale di quel punto. Se per es. la carica del primo corpo è E_1, del secondo corpo E_2 e la loro distanza è R, il potenziale sarà $\frac{E_1 E_2}{R}$. Questo potenziale è *mutuo* e dipende unicamente dalla

posizione relativa dei due corpi, cosicchè non ha alcuna influenza il fatto che sia stato E_2 ad attrarre E_1 o viceversa.

Nel caso di parecchi corpi che conferiscano ciascuno un potenziale, il potenziale totale si ottiene sommando semplicemente i potenziali parziali; tenendo presente tuttavia che la forza è attrattiva anzichè ripulsiva, il potenziale sarà negativo. Le cariche avranno segni opposti, cioè E_1 e $-E_2$ ed il risultato $\frac{E_1 \times -E_2}{R}$ è un potenziale negativo, ossia si risparmia lavoro anzichè compierne quando si congiungono le due cariche.

Ne segue che se le due cariche E_1 e $-E_2$ sono eguali, il potenziale totale in tutti i punti da esse equidistanti è eguale a zero, in un caso essendo $\frac{E}{R}$ e nell'altro $-\frac{E}{R}$. Ora siccome tutti i punti equidistanti da due altri punti sono contenuti in un piano normale alla linea di congiunzione nel suo punto medio (fig. 5), così si rileverà facilmente come noi ci troviamo qui dinanzi ad un caso ben noto nell'ottica. Se E_1 è un punto luminoso ed AB una superficie riflettente, E_2 sarà «l'imagine» di E_1. Possiamo avere altri punti simili accanto ad E_1 ma se alla medesima distanza dal lato opposto esistono punti con carica eguale ed

Fig. 5.

opposta, la superficie AB sarà sempre una superficie equipotenziale col potenziale a zero. Per contro se le cariche dal lato opposto di tale superficie venissero annullate, e la superficie fosse mantenuta ad un potenziale zero (come potrebbe essere mantenuta una piastra di metallo collegandola colla terra), delle cariche opposte dovrebbero venire distribuite sulla sua superficie onde compensare le cariche annullate e mantenere inalterata la quantità di forza in ogni punto della stessa superficie. Questa considerazione ci permette di calcolare la distribuzione della carica elettrica per « induzione ». Il metodo a ciò adoperato è uno dei più efficaci ed attendibili, ed è chiamato il « metodo delle immagini elettriche ».

La superficie AB essendo una superficie equipotenziale, non è necessario alcun lavoro per spostare un corpo su di essa. Se la distanza fra E_1 ed E_2 è di 2R, la distanza del piano da E_1 è R. Ora il lavoro necessario per portare una compagnia di elettroni dall'infinito entro R cm. dalla carica E_1 era di $\frac{E_1}{R}$ quando E_1 era isolato nello spazio. Questo valore è ridotto a zero in un punto a cagione della presenza di E_2. Ciò dimostra che il potenziale dovuto ad una carica può essere controbilanciato ed annullato dal potenziale dovuto ad un'altra carica. Ora quantunque il potenziale dovuto a ciascun corpo rimanga per sè stesso costantemente immutato, tuttavia il potenziale netto in un punto qualsiasi dipende da tutte le

cariche libere esistenti nello spazio, e quindi può assumere qualunque valore a noi piaccia di attribuirgli. Se il punto in questione fosse ad es. collocato alla superficie di una sfera conduttrice carica, ne seguirebbe che il « potenziale di quella sfera » sarebbe similmente assoggettato all'influenza delle cariche circostanti, essendo abbassato dall'influenza di qualunque carica di segno opposto. Per ricondurre il vero potenziale al suo alto valore iniziale dobbiamo aumentare la carica della sfera stessa. Se il potenziale è stato dimezzato dobbiamo raddoppiare la carica per ricondurre il potenziale al valore primitivo. Se il potenziale è molto basso, il conduttore può portare una forte carica; esso possiede, per così dire, una grande capacità di carica. Questa concezione della capacità è assai importante cosicchè è qui necessario definirla in modo più preciso: « La capacità di un conduttore è la carica ne« cessaria a sollevarlo all'unità di potenziale ». Una sfera avente un raggio di 1 cm. possiede l'unità di potenziale (1 dina per ciascuna unità di carica respinta, quando contiene un'unità di carica (1 « compagnia »). Se il raggio di una sfera è di 2 cm., il potenziale della stessa è $^1/_2$, e per portarla ad avere l'unità di potenziale la sua carica deve venire elevata a due « compagnie »; se il raggio è di 3 cm., 3 « compagnie » ecc. Possiamo quindi formulare la seguente regola: *La capacità di una sfera è proporzionale al suo raggio.*

Se la sfera carica ha una superficie elastica,

la mutua ripulsione delle cariche avrà per effetto una dilatazione della superficie. Questo si prova soffiando una bolla di sapone e quindi caricandola: la bolla si espande e la sua capacità aumenta.

Quando due conduttori caricati oppostamente si avvicinano, il potenziale di ciascuno di essi si abbassa e la loro capacità aumenta. Anche in questo caso il movimento spontaneo conduce ad un aumento nelle capacità.

Quando due corpi caricati in modo simile si respingono e si allontanano uno dall'altro, il loro potenziale si abbassa ed anche in questo caso la loro capacità aumenta.

Sta la regola generale: *Se dei conduttori carichi sono liberi di muoversi, essi si spostano sempre in modo tale da ridurre a un minimo il loro potenziale e ad un massimo la loro capacità.* Il movimento così generato conduce, com'è ovvio, ad una diminuzione di energia potenziale. Per la legge della conservazione dell'energia non si può verificare perdita alcuna nell'energia totale, cosicchè ciò che si perde in energia potenziale viene ricuperato sotto forma di energia di movimento o energia cinetica. Dovremo riparlare di quest'energia *cinetica* quando tratteremo dell'elettrone in movimento.

5. *Condensatori.* — Abbiamo veduto che quando un conduttore caricato positivamente viene avvicinato ad un altro conduttore caricato negativamente, la capacità di entrambi i conduttori aumenta.

Per rendere la cosa più facile consideriamo una superficie indefinita conduttrice AB (fig. 6) ed un punto P preso fuori di essa. Supponiamo che gli elettroni siano uniformemente distribuiti al disopra della superficie nello spazio infinito e che P contenga una compagnia di elettroni; noi possiamo dimostrare che la ripulsione fra il piano e P è indipendente dalla distanza di P dal piano. Infatti:

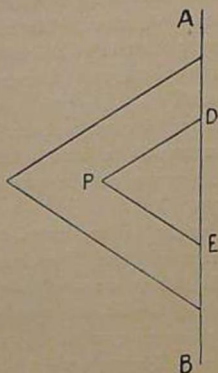



Fig. 6.

Tracciamo due linee PD, PE, aventi eguale inclinazione rispetto al piano AB. Tracciamo linee simili tutto intorno a P formando un cono avente il suo apice nel punto P. La base del cono sarà un circolo nella superficie AB e tutti gli elettroni contenuti in quel circolo respingeranno P. Supponiamo che la loro forza totale di ripulsione sia 1000 dine. Se allontaniamo il punto P fino ad una distanza doppia senza mutare il valore degli angoli formati fra le linee partenti da esso ed il piano AB, queste linee, formanti la superficie laterale del cono, avranno una lunghezza doppia e la base del cono sarà quadrupla dell'area precedente. Vi sarà quindi un numero

quadruplo di elettroni che eserciteranno una forza di ripulsione; ma siccome la loro distanza è doppia della precedente, tale forza deve essere divisa per 4 (il quadrato della distanza) e la forza netta sarà *eguale alla precedente*. Questo ragionamento vale qualunque sia la grandezza dell'angolo all'apice del cono, cosicchè noi potremmo costruire quest'angolo così grande ed il cono così schiacciato che la ripulsione degli elettroni esterni al cono diventi praticamente impercettibile (1).

Avendo veduto che la ripulsione è la stessa a qualsiasi distanza, calcoliamone ora il valore. Supponiamo che il punto P sia alla distanza di 100 cm. dal piano e che il piano contenga 1000 compagnie su ciascun cm.^{2} La forza ripulsiva esercitata dal cm^2 quadrato $a\ b$ di tale superficie, più vicino al punto P, sarà di (pag. 41):

$$\frac{1 \times 1000}{100^2} = \frac{1}{10} \text{ di dina.}$$

Descriviamo ora intorno al punto P una sfera tangente al piano e prendiamo su quest'ultimo

(1) Dobbiamo aggiungere che per la validità di questo ragionamento la densità degli elettroni sulla superficie considerata deve essere molto grande, altrimenti l'ulteriore orientamento degli elettroni dovuto alla ripulsione di P produrrebbe effetto simile a quello che sarebbe prodotto da una carica di atomi positivi disposti al punto " imagine „ di P nel piano. Questa imagine attrarrebbe P e diminuirebbe quindi la ripulsione. Se tuttavia la densità sulla superficie è grande, questa attrazione può essere trascurata poichè non ha influenza sensibile.

un altro cm^2, per es. $c\,d$. Ora supponendo che sul quadrato $c\,d$ esistano 1000 compagnie, esse respingeranno P colla stessa forza di prima, cioè 0,1 dine. Ma questa forza non avrebbe la stessa efficacia che aveva dianzi, poichè è inclinata invece che perpendicolare. Prolunghiamo ora Pc e Pd fino ad essere Pc^1 e Pd^1 e facciamo $P^1 = 2Pc$. Ora se la superficie virtuale c^1d^1 avesse la medesima densità della superficie $c\,d$ la sua forza su P sarebbe eguale essendo la sua carica quadrupla e la sua distanza doppia. Prolungando Pd^1 in Pe^1 e completando l'intersezione col piano, determiniamo una nuova superficie c^1e^1, la cui grandezza è tanto maggiore qnanto più Pc^1 è obliquo rispetto alla superficie considerata. Questa inclinazione di Pc^1 compensa l'inclinazione della spinta degli elettroni repellenti della superficie c^1e^1 e noi troviamo che la loro forza totale di ripulsione è eguale a 0,1 di dina, come dianzi. Lo stesso ragionamento vale per ogni cm^2 che noi prendessimo ad esaminare sull'emisfero tangente al piano. La quota totale risulta quindi eguale a tante volte 0,1 dina quanti sono i cm^2 della superficie dell'emisfero, cioè: $2\pi\,a$ (raggio)^2, ossia, poichè il raggio è di 100 cm., la forza totale sarà di

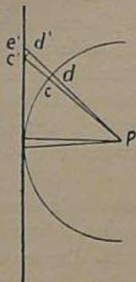



Fig. 7.

$$2\pi \times 0{,}1 \times 100^2 \text{ dine}$$
$$= 2\pi \times 1000 \text{ dine}$$

o 2π (6,2832) moltiplicato per il numero delle compagnie contenute su ogni cm² del piano.

Il numero di compagnie o unità contenute in ogni cm² è chiamato « densità superficiale elettrica » e viene indicato complessivamente con σ. Abbiamo quindi

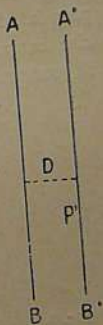
$$\text{Forza in ogni unità} = 2\pi\sigma$$

a qualsiasi distanza da un piano carico infinitamente e da ambo le parti dello stesso.

Nell'attraversare il piano muta bensì la direzione della forza ma ne rimane invariata la grandezza.

Supponiamo ora due piani paralleli indefiniti e conduttori posti ad una distanza reciproca eguale a D (fig. 8) aventi eguale densità superficiale di segno contrario, cosicchè se AB contiene per es. 1000 compagnie di elettroni su ogni cm², A^1B^1 contenga 1000 compagnie di atomi carichi positivamente per ogni cm².

Fig. 8

Possiamo dimostrare che nel campo compreso fra i due piani suddetti non vi è alcuna forza elettrica. Per es. nel punto P^1 la forza dovuta ad AB è di $2\pi\sigma$ e la forza dovuta a A^1B^1 è $-2\pi\sigma$ cosicchè la somma di queste due forze è eguale a zero. In altre parole, la carica positiva di A^1B^1 « neutralizza » la

carica negativa di AB per tutto lo spazio infinito esterno alle due superfici.

Quale sarà la differenza di potenziale fra AB ed A^1B^1? In altre parole, quale lavoro dovrebbe venire esercitato per trasportare una compagnia di elettroni da A^1B^1 in AB?

È ovvio che esso sarà eguale alla forza totale in D. Ora la forza esercitata su una compagnia di elettroni è una forza ripulsiva da AB eguale a $2\pi\sigma$ ed una forza di attrazione da A^1B^1 di valore eguale. Queste due forze avendo direzione eguale, si sommano e la forza totale in un punto qualsiasi posto fra i due piani è di $4\pi\sigma$. Cosicchè il lavoro da esercitarsi su una compagnia di elettroni sarebbe eguale a $4\pi\sigma D$, che rappresenta pure il valore della differenza di potenziale fra AB ed A^1B^1.

Fig. 9.

Un sistema simile a quello sopra considerato, composto di due conduttori separati da un corpo non conduttore, dicesi un « condensatore ». Il condensatore più noto è la cosidetta bottiglia di Leyda (fig. 9), in cui i conduttori sono rappresentati da foglie di stagno disposte all'esterno ed all'interno di una bottiglia di vetro, e l'isolatore dal vetro interposto.

La capacità di un condensatore è misurata dalla carica che deve venire impartita a ciascun conduttore per ridurre ad un'unità la differenza del loro potenziale, affinchè sia necessario un solo ergon di lavoro per trasportare una compagine

di elettroni da un conduttore all'altro. E poichè la differenza di potenziale fra i due piani è di

$$4\pi\sigma D$$

e questa è eguale a 1, abbiamo

$$\sigma = \frac{1}{4\pi D}$$

come capacità di un'unità superficiale di un condensatore formato da due piani infiniti. La capacità essendo inversamente proporzionale al valore di D, se noi facciamo D sempre più piccolo avvicinando le due lastrine, potremo ottenere un condensatore avente qualsiasi capacità desiderata. Il vantaggio di adottare condensatori di grande capacità è quello che si possono accumulare in essi cariche notevoli con poco lavoro e con minima tendenza a scariche pericolose, non essendovi forza fuori dei rivestimenti. Da ciò il nome di « condensatore ».

Se però si congiungessero le lastrine per mezzo di un filo metallico od altro corpo conduttore, la mutua ripulsione degli elettroni fra di loro e la mutua attrazione degli atomi positivi fra di loro li spingerà entrambi a raccogliersi sul filo su cui si incontreranno e dove gli elettroni saranno assorbiti dagli atomi positivi risultandone degli atomi neutri. L'energia potenziale che essi possedevano si muterà dapprima in movimento, di poi in calore. Se il filo di congiunzione è interrotto da una breve lacuna contenente aria, la scarica si produrrà attraverso l'aria e si avrà

una scintilla — la nota scintilla data dalle sfere della bottiglia di Leyda.

Un condensatore composto di due piani indefiniti è naturalmente di impossibile attuazione, ma viene supposto per comodità di ragionamento, e ci serve a passare insensibilmente alla costruzione pratica di un condensatore senza sacrificare i risultati dei nostri calcoli precedenti. Se le lastrine fossero, per es. delle dimensioni di 1 m² ciascuna, la capacità del condensatore sarebbe di

$$\frac{100^2}{4\pi D}$$

all'incirca; ma la distribuzione delle cariche sulle piastre non sarebbe uniforme perchè esse si affollerrebbero sugli orli. D'altra parte, le cariche nella porzione centrale sarebbero uniformi, o molto approssimativamente uniformi, e se noi potessimo separare un solo cm² al centro di ciascuna lastrina noi otterremmo con grande approssimazione le perfezione teorica dei due piani indefiniti dianzi considerati e potremmo applicare validamente la nostra formola. Se noi separassimo nettamente questa piccola area dall'area circostante, ma le riunissimo poi mediante un sottilissimo filo metallico onde mantenere l'area minore allo stesso potenziale dell'area più grande, noi potremmo considerare le due piccole aree come formanti un condensatore ideale a piastre parallele suscettibili di calcolo.

Così se le aree sono di 1 cm² e la loro carica

è di 1000 compagnie di elettroni ed esse si trovano collocate ad una distanza di 1 mm. una dall'altra, la capacità di questo piccolo condensatore sarebbe di

$$\frac{1}{4\pi \times 0,1} = \frac{1}{12,6 \times 0,1} = 0,795\,.$$

La carica essendo di 1000 compagnie, la differenza di potenziale è

$$\frac{1000}{0,795} = 1260$$

cosicchè sarà necessario il lavoro di 1260 ergon per trasportare una compagnia di elettroni dalla superficie positiva alla negativa.

L'attrazione fra le due aree è di

$$\frac{1000 \times 1000}{(0,1)^2} = 100 \text{ milioni di dine}$$

cioè circa 100 volte la pressione atmosferica che agisce su di esse. Se la distanza che le separa fosse invece di 1 cm., l'attrazione reciproca controbilancierebbe appunto la pressione atmosferica, cosicchè se fuori dei due piani considerati esistesse il vuoto, la pressione atmosferica agente fra i due piani non li allontanerebbe uno dall'altro.

Se noi applicassimo una molla a una delle due lastrine e la tendessimo fino a trarre la piccola piastrina indietro ed in linea colla lastrina più grande, noi troveremmo che la forza sulla molla sarebbe di 102 chilogrammi o di 221 lb. Se la carica su ciascuna lastra fosse doppia, la

forza necessaria sarebbe quadrupla cioè eguale a 884 lb. Inversamente: conoscendo la forza, noi potremmo calcolare il numero delle compagnie su ciascuna delle superfici.

La regola è la seguente: « Per ottenere il numero delle compagnie di elettroni contenuti su ciascuna lastrina è necessario moltiplicare la distanza delle lastrine per la radice quadrata della forza espressa in dine ». Se la forza fosse espressa in grammi, è necessario dividerla per 981 onde convertirla in dine.

Il numero di compagnie per unità di superficie si trova dividendo il numero trovato per l'area della lastrina (nel caso precedente per 1). Il principio sopra esposto è quello su cui si basano tutte le più accurate misure delle quantità elettriche. Lord Kelvin ha inventato uno strumento atto ad eseguire queste misure, noto sotto il nome di elettrometro del disco attratto (1). L'inventore chiamò « anello di guardia » la larga superficie circostante al disco principale.

Lo strumento più in uso però per tali misure è l'elettrometro a quadrante, in cui un indice piano e carico si sposta sopra ai quattro quadranti di un circolo, due dei quali sono mantenuti al potenziale da misurarsi. Però il calcolo riferentesi a questo strumento è assai più complicato.

Se due piani paralleli venissero incurvati così

---

(1) Dicesi anche, da noi, *elettrometro assoluto*.
(N. d. Tr.).

da formare due sfere concentriche, è evidente che non vi sarebbe variazione alcuna nella distribuzione delle loro cariche e la loro capacità per unità di superficie sarebbe $\frac{1}{4\pi D}$ come dianzi. Cosicchè chiamando r il raggio medio, se D è molto piccolo, la superficie di ambe le sfere sarà circa $4\pi r^2$ e la loro capacità totale sarà:

$$\frac{4\pi r^2}{4\pi D} = \frac{r^2}{D}.$$

Per accumulare una grande quantità di elettricità dovremo quindi costruire le sfere molto grandi ed i loro raggi quasi eguali. Se σ è la densità superficiale, la forza fra le due superfici sarà di $4\pi\sigma$ per ciascuna unità di superficie come nel caso dei piani indefiniti. Ora questa forza è *eguale a quella sviluppata dalla sola sfera interna*. Infatti la carica totale sulla sfera interna è $\sigma \times$ superficie $= \sigma \times 4\pi r^2$. Essa agisce verso l'esterno come se fosse concentrata al centro della sfera, cosicchè la sua forza ad una distanza r è

$$\frac{4\pi\sigma r^2}{r^2} = 4\pi\sigma$$

e la carica della sfera esterna non esercita alcuna forza verso l'interno. Gli elettroni distribuiti su ciascun elemento della sua superficie esercitano la loro forza come d'uso secondo la legge dell'inversità del quadrato; ma per ogni gruppo da uno dei lati vi è un gruppo più lontano ma corrispondentemente più grande sul lato opposto della stessa superficie, il quale contro-

bilancia la sua forza. Facendo un ragionamento simile a quello fatto nel caso dei due piani indefiniti, noi potremo estendere la regola a conduttori carichi di qualunque dimensione e formularla nel modo seguente: « La distribuzione delle cariche su una superficie conduttrice chiusa è sempre tale che il campo di forza risultante dalle sue proprie cariche o da cariche esterne ad essa sia zero in ogni punto interno alla stessa ».

Una superficie conduttrice chiusa, od anche una gabbia di fitta rete metallica, agisce quindi come un perfetto schermo contro tutte le forze elettriche ad essa esterne. Tali gabbie sono adoperate sovente per proteggere delicati strumenti misuratori contro le influenze esterne. Questo involucro protettore può venir scaricato fino a che si ottenga la produzione di scintille e di scariche a pennacchio in ogni suo angolo, ma il rivelatore più sensibile posto nel suo interno non segnerebbe il minimo effetto. Qualsiasi carica da cui si voglia ottenere un effetto nell'interno deve essere collocata entro la superficie chiusa.

6. *Potere induttore specifico.* — Ritorniamo per un istante ai piani indefiniti esaminati precedentemente e studiamo l'effetto che si produrrà inserendo fra gli stessi una piastra conduttrice RS che occupi metà della distanza che li separa (fig. 10). In qualsiasi sostanza conduttrice vi è sempre un certo numero di elettroni e di atomi positivi disposti ad obbedire alle forze elettriche. Gli elettroni si affolleranno verso

S e gli atomi positivi verso R fino a che la forza elettrica nell'interno della lastra diventi eguale a zero. Per ottenere questo è necessario che la densità superficiale in R sia eguale e contraria a quella in AA^1 e che la densità in S sia eguale e contraria a quella su BB^1. Otteniamo così in pratica due condensatori collegati secondo il sistema detto della « cascata », il potenziale abbassandosi come il livello in due cascate successive.

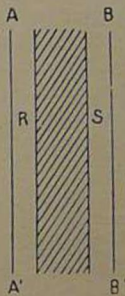



Fig. 10.

Vediamo ora quale differenza sarà prodotta sul lavoro richiesto a trasportare una compagnia di elettroni da BB^1 in AA^1. La forza tra S e R è zero. La forza tra BB^1 e S e tra R ed AA^1 è la stessa di prima, essendo dovuta alla stessa densità superficiale e, come abbiamo visto, indipendente dalla distanza. Ma la distanza per cui la compagnia di elettroni dovrà contrastare a questa forza è stata dimezzata dall'interposizione di un conduttore di spessore $\frac{D}{2}$. Quindi il lavoro è ridotto a metà come pure la differenza di potenziale e la capacità è invece raddoppiata. Lo stesso effetto verrebbe prodotto riducendo semplicemente la distanza D a $\frac{D}{2}$ senza interporre la lastra metallica.

Si vede quindi come la capacità di un condensatore aumenti quando fra i suoi rivesti-

menti sia interposto un corpo conduttore. Se invece di una lastra metallica introducessimo una serie di piccoli conduttori, il loro effetto dipenderebbe bensì dalla loro densità e dimensione, ma la capacità del condensatore verrebbe sempre aumentata.

La proprietà per cui una sostanza introdotta fra i rivestimenti di un condensatore ne aumenta la capacità è chiamato il potere induttore di questa sostanza e il potere induttore specifico della stessa è misurato dal rapporto in cui è aumentata la capacità del condensatore sostituendo questa sostanza all'aria fra i due rivestimenti.

Il potere induttore specifico di un mezzo, scoperto e denominato dal Faraday, è ora chiamata la costante dielettrica del mezzo stesso.

Diamo qui alcuni valori di queste costanti: Vetro da 3 a 7; ebanite da 2 a 3,5; mica da 7 a 10; petrolio 2; alcool 25; ghiaccio 78; metalli, infinita. I condensatori vengono costruiti abitualmente in mica a cagione della sua alta costante dielettrica.

Il potere induttore specifico di un mezzo è dovuto al numero di elettroni che esso contiene ed alla distanza a cui questi elettroni vengono spostati dalla loro posizione normale sotto l'influenza di una forza elettrica esterna. In molti mezzi, specialmente nella guttaperca, questo spostamento impiega un certo tempo ad annullarsi dopo avvenuta la scarica, mentre che nella mica questa elettrizzazione residua è minima.

La teoria degli elettroni è fino ad oggi inetta a spiegare se la differenza nella capacità specifica d'induzione dei varî mezzi isolatori sia dovuta alla configurazione od alla mobilità degli elettroni. Sappiamo però, dalla teoria elettromagnetica della luce creata dal Maxwell, che la costante dielettrica è proporzionale al quadrato del tempo impiegato da lunghe onde di forza elettrica ad attraversare il mezzo stesso.

Se due cariche sono separate nè dal vuoto nè dall'aria (la cui costante dielettrica è di pochissimo più alta di quella del vuoto), ma da un mezzo isolatore a costante dielettrica eguale a R, la forza fra esse sarà non già $\frac{E_1 E_2}{r^2}$ ma $\frac{E_1 E_2}{K r^2}$. Questo fatto deve essere ricordato quando dei corpi carichi di elettricità vengono immersi in un mezzo che non sia aria. Parimenti il potenziale di una sfera carica di raggio R diventa $\frac{E}{KR}$ e la sua energia è ridotta di K volte.

7. *Macchine elettrostatiche.* — Una macchina elettrostatica è una macchina adoperata a separare gli elettroni dagli atomi positivi. La prima macchina di questa specie fu rappresentata da una bacchettina d'ambra ed uno strofinaccio di lana. Essa fu perfezionata da Ottone di Guericke nel 1663, il quale costruì una macchina formata da una sfera di zolfo che girava intorno al suo asse e veniva strofinata colla mano. Lo zolfo attraeva gli elettroni dalla mano e si elettrizzava quindi negativamente.

Questo procedimento dicesi « elettrizzazione

per frizione » e fu per lungo tempo il solo modo conosciuto per produrre una carica elettrica. Per gli esperimenti di piccola importanza si adopera per lo più una bacchettina di vetro strofinata con seta. In questo caso la seta attrae gli elettroni dal vetro cosicchè questo risulta caricato « positivamente ».

Il procedimento intimo dell'elettrizzazione per frizione è tuttora molto oscuro. Si sa però che esso dipende molto dalle condizioni della superficie e dalla natura e struttura chimica dei corpi.

Delle sostanze comunemente note la pelle di gatto cede gli elettroni assai facilmente e lo zolfo li assorbe con eguale facilità, cosicchè una macchina composta di queste due sostanze è grandemente efficace.

Possiamo supporre che alla superficie di ogni corpo non carico esista un certo numero di elettroni disposti ad abbandonare gli atomi positivi a cui stanno uniti. La pelle di gatto sarebbe assai ricca di questi elettroni liberi e lo zolfo ne sarebbe assai scarso. L'effetto dello sfregamento fra questi due corpi sarebbe l'opportunità data a questi elettroni liberi di passare dalla pelle allo zolfo ove sarebbero fortemente trattenuti. Quando noi abbiamo un corpo carico è facile ottenere altri corpi carichi per induzione. Abbiamo veduto sopra (pag. 40) che quando un conduttore viene portato in vicinanza di un corpo carico negativamente — per es. un blocco di zolfo strofinato — gli elettroni liberi sono spinti all'estremità più lontana dal blocco mentre che

gli atomi positivi sono attratti da esso. Se spezziamo in due parti il conduttore ed allontaniamo lo zolfo, otteniamo un conduttore carico positivamente ed un conduttore carico negativamente. Oppure, invece di rompere il conduttore in due, possiamo senz'altro adoperare due conduttori collegati metallicamente separandoli poi mentre sono ancora in vicinanza dello zolfo. Oppure possiamo fare in modo che gli elettroni respinti passino alla terra e poi rompere il collegamento ed ottenere un conduttore carico positivamente, e questo procedimento può venire continuato infinitamente, cosicchè possiamo ottenere un numero qualsiasi di atomi positivi da una sola carica di elettroni, non senza ottenere però un egual numero di elettroni liberi. Le prime macchine elettrostatiche separavano gli elettroni dagli atomi positivi e quindi sfruttavano la loro attrazione reciproca per accumularli nei condensatori. Questo accumularsi di elettricità è molto simile a quello che avviene per l'acqua trattenuta in recipienti, cisterne, serbatoi, dalla gravità terrestre. Però le sostanze impiegate dànno luogo a risultati opposti. Per l'acqua infatti l'aria è penetrabile e il metallo impenetrabile, per cui l'acqua è separata dal lato adiacente alla terra mediante un metallo o altro corpo solido. Per l'elettricità invece l'aria è impenetrabile ed i metalli sono penetrabili; cosicchè i metalli carichi devono essere « isolati » mediante un qualche corpo non conduttore.

Le macchine più perfezionate operano per in-

duzione ma la loro efficacia è ancora molto lontana dalla perfezione. La macchina elettrostatica ideale è quella in cui gli elettroni possono essere separati dagli atomi positivi con l'effettuazione di un lavoro minimo il quale possa venire ricuperato *interamente* facendo ricombinare le due elettricità.

Nell'accumulare l'elettricità separata nei condensatori un limite è imposto dalla diversa « forza dielettrica » del mezzo isolatore. Quando l'aria o altro mezzo dielettrico interposta fra i due rivestimenti di un condensatore è sottoposta a una determinata tensione, un elettrone si distacca dal rivestimento carico negativamente e corre verso il rivestimento carico positivamente. Durante il suo passaggio esso incontra un certo numero di atomi neutri e li scinde in « ioni » di segno opposto. Questi ioni in pratica diminuiscono la distanza fra i rivestimenti e quindi aumentano la tensione, cosicchè si produce un ulteriore affollarsi di elettroni e di atomi positivi gli uni incontro agli altri, derivandone un tumultuare ed un turbinare di movimenti, collisioni, divorzi e connubî. Si verifica allora la produzione di una scintilla elettrica, ovvero, se il fenomeno avviene su larga scala nell'atmosfera, abbiamo il lampo ed il tuono.

CAPITOLO IV.

La scarica elettrica.

1. *La Scarica in generale.* — Sempre quando un elettrone si sposta da un luogo all'altro si può dire che avviene una scarica elettrica dal primo luogo al secondo. Però per « scarica elettrica » in generale s'intende il processo per cui un corpo perde la carica che lo distingue, nel campo dell'elettricità, dai corpi circostanti.

Questi corpi circostanti, come ad es., tavole, pareti, ecc., sono ordinariamente uniti alla terra per mezzo di conduttori più o meno buoni, ed ogni corpo che si trovi allo stesso potenziale della terra non mostra di possedere alcuna carica elettrica.

Ora, quale sarà il potenziale della terra? In altre parole, qual'è il lavoro necessario a trasportare una compagnia di elettroni da una di-

stanza infinita alla superficie della terra? Questa domanda non ha facile risposta, ma il lavoro occorrente può venire calcolato all'incirca in un milione di ergon. Infatti la carica della terra è negativa, cioè respinge gli elettroni ed attira gli atomi positivi.

Sotto questo aspetto la terra si comporta come un elettrone e chi può dire che se esistesse un elettrone avente le dimensioni della terra, esso non avrebbe una spiccata rassomiglianza col pianeta che ci ospita? Questa rassomiglianza è accresciuta per il fatto che il sole ha un'enorme carica positiva che Arrhenius calcolò in 25×10^{10} « coulombs » ($= 7,5 \times 10^{20}$ compagnie), risultandone un potenziale di 10^{10} unità o 3 bilioni di « volts ». Il sole si può quindi paragonare ad un atomo positivo avente una serie di elettroni carichi negativamente (i vari suoi pianeti) in rivoluzione intorno a sè stesso. Ma l'analogia scompare quando misuriamo le forze agenti tra il sole ed i pianeti. Infatti l'attrazione elettrica è quasi impercettibile se la si paragona alla forza di gravitazione, tanto che gli astronomi possono trascurarla senza pregiudizio dei loro calcoli.

Se anche il potenziale negativo della terra fosse in realtà eguale a un milione di unità, (300 milioni di « volts ») come dianzi abbiamo supposto, la sua azione sopra un corpo elettrizzato situato alla sua superficie sarebbe infinitamente piccola. Se questo potenziale fosse dovuto unicamente alla carica propria della terra, questa carica sarebbe di 6×10^{14} compagnie,

che possiamo supporre raccolte al suo centro, cioè alla distanza di 6×10^8 cm. dalla superficie. La forza di ripulsione esercitata su una compagnia di elettroni alla superficie della terra sarà quindi di

$$\frac{6 \times 10^{14}}{(6 \times 10^8)^2} = \frac{1}{6} \times 10^{-2} \text{ dine}$$

ossia circa $\frac{1}{500}$ del peso di un milligramma.

Questa quantità è al disotto del limite di sensibilità delle più delicate bilancie.

Vi è tuttavia una corrente costante di elettricità, ascendente o discendente attraverso l'aria, su cui le condizioni atmosferiche hanno grande influenza; questa corrente è quella che dà luogo ai fulmini ed agli altri fenomeni di elettricità, così detta atmosferica. Oltre l'atmosfera la terra si comporta come un corpo intensamente carico e le scariche della sua elettricità negativa sono talvolta visibili nelle regioni polari e note col nome di Aurore (1). La conduttività dell'aria (come quella di qualsiasi altro corpo) dipende unicamente dalla densità e dalla mobilità degli ioni o corpi carichi che essa contiene. Questi ioni possono essere tanto elettroni, quanto atomi positivi, od ancora possono essere questi e quelli associati a una quantità più o meno grande di materia neutra. La presenza di questi ioni nell'aria costituisce la cosidetta « ionizzazione » dell'atmosfera. Non

(1) Cfr. P. Villard, *Comptes rendus*, 9 luglio 1906.

può avvenire scarica ove non sia ionizzazione. È questo un fatto accertato solo recentemente: si sapeva però da lungo tempo che ogni corpo carico esposto all'aria si scarica gradatamente, ma questo fatto veniva attribuito all'umidità, alla polvere circostante e perfino alla carica ceduta alle molecole dell'aria. Noi sappiamo ora che la scarica avviene anche se si evita scrupolosamente la formazione di umidità o la presenza di particelle di polvere, ma non avviene se la ionizzazione è assolutamente impedita. Se la ionizzazione esiste, l'entità di essa determina il rapporto in cui la scarica graduale del corpo si effettua.

Ora si trovano dei ioni nei corpi solidi, liquidi ed aeriformi e la scarica può quindi prodursi attraverso a un corpo che si trovi in uno qualunque di questi tre stati e persino attraverso il vuoto. Ma in quest'ultimo caso gli ioni dovranno essere provveduti dal corpo stesso che si scarica, poichè il vuoto è di per sè un perfetto isolatore.

Vi sono ancora altri casi in cui la scarica deve produrre gli ioni ad essa necessari. Fra essi sono notevoli la scarica nell'arco delle lampade elettriche e la produzione della scintilla ove l'aria sia troppo povera di ioni per trasmettere l'intera scarica. Però prima dell'inizio di tali scariche è necessario, di regola, che un piccolo numero di ioni esista nel mezzo in cui la scarica si dovrà produrre. Quando non esiste alcun ione, il mezzo è un perfetto isola-

latore. Una scarica potrebbe avvenire solo quando vi fosse una forza sufficiente a proiettare gli ioni dal corpo carico, interrompendo meccanicamente l'isolatore.

Tutte queste specie di scariche elettriche possono venire raggruppate in cinque classi distinte a seconda che avvengono attraverso a corpi isolanti, a conduttori aeriformi, liquidi o solidi, o attraverso il vuoto.

2. *Scariche attraverso i corpi isolatori.* — Isolatori o coibenti si dicono quei corpi che non contengono elettroni erranti. I loro elettroni sono solidamente uniti agli atomi, e questi ultimi sono alla loro volta solidamente riuniti in molecole complesse. Tali sostanze sono quindi, di regola, chimicamente inattive: esse non sono suscettibili di ossidazione, nè si disciolgono nell'acqua. La paraffina, corpo isolante in grado assai notevole, è appunto denominato dalla sua inazione chimica *(parum affinitatis)*. L'affinità chimica, molto probabilmente, è una proprietà dovuta unicamente agli elettroni separabili. Quando gli elettroni di una sostanza non si possono distaccare dai loro atomi o dai gruppi molecolari, non è facile ottenere che essi penetrino in un metallo per neutralizzare gli atomi positivi che esso può contenere. E, d'altra parte, gli atomi positivi essendo ampiamente provvisti di elettroni, non hanno tendenza a combinarsi con elettroni, posti all'esterno.

Molti dei migliori isolatori, come paraffina, cera vergine, guttaperca, ebanite ed ambra sono

complicate combinazioni di carbonio. Essi sono poco densi, le loro molecole non sono strettamente aderenti e i loro atomi non sono pesanti. Tali associazioni molecolari complesse possono venire facilmente separate le une dalle altre, e gli elettroni sono come imprigionati fra esse.

Se un isolatore come la benzina C_6H_6 è limitato da un lato con una superficie contenente un gran numero di elettroni liberi e dal lato opposto con una superficie contenente un gran numero di atomi positivi liberi, gli elettroni contenuti fra le molecole della benzina saranno spostati per uno spazio più o meno grande aggruppandosi contro gli atomi positivi, ed invece il carbonio e gli atomi d'idrogeno, specialmente questi ultimi, si affolleranno verso la superficie che contiene l'eccedenza d'elettroni.

Se mai esistessero nell'isolatore degli elettroni liberi essi si aprirebbero la via per recarsi a neutralizzare gli atomi positivi nel punto più vicino producendovi per tal modo una scarica elettrica. Ma un buon isolatore non contiene mai elettroni liberi e quindi non si produce alcuna scarica a meno che la forza non sia abbastanza grande da strappare gli elettroni alle molecole della benzina e metterli in libertà. Se ciò avviene, i fenomeni si succedono con grande rapidità: gli elettroni affluiranno verso l'estremo positivo e saranno altrettanto rapidamente sostituiti da altri elettroni accorrenti dall'estremo negativo opposto. Questa doppia combinazione pro-

durrà una commozione considerevole nell'interno dell'isolatore cosicchè si romperanno altre molecole ed esso acquisterà una conduttività dovuta agli elettroni liberi ed ai ioni positivi liberi. Nella linea retta congiungente i due limiti estremi avverranno delle rapide separazioni e combinazioni di ioni che aumenteranno ancora in proporzione all'accrescersi della conduttività dell'isolatore. Il calore sviluppantesi volatilizzerà l'isolatore liquido e la scarica continuerà con rapidità torrenziale attraverso al gaz saturo di ioni i quali acquistano una velocità che aumenta coll'aumentare dello spazio libero da essi percorso sotto l'impulso della forza elettrica. Anche quando la forza sarà esaurita completamente, gli ioni continueranno ad affluire, come quando un pendolo continua le sue oscillazioni vincendo la forza di gravità, e appunto come il pendolo gli ioni ritorneranno indietro producendo una corrente temporanea nella direzione contraria. Possono seguire ancora delle oscillazioni minori fino a tanto che l'energia verrà irradiata nello spazio e l'equilibrio sarà ristabilito.

Il procedimento esposto è quello che avviene nella scintilla elettrica o, in più larga scala, nella saetta del fulmine. Se l'isolatore è un solido, il cammino della scarica rimarrà visibile per il foro prodottosi, come si può vedere esperimentando con vetro, mica, ebanite, carbone e simili. Per forare lo spessore di 1 mm. del migliore isolatore, è necessaria la forza di 30.000 volts (100 unità elettrostatiche di potenziale).

Ciò significa che il lavoro effettuato da una compagnia di elettroni nel passare dall'estremo negativo al positivo è di 100 ergon, energia sufficiente a produrre il numero di ioni necessario perchè la scarica possa continuare.

Se lo spessore dell'isolatore è più grande, la differenza di potenziale necessaria aumenta pure ma non nella stessa proporzione. Se D è lo spessore del dielettrico, la differenza di potenziale necessaria aumenta come $\sqrt[3]{D^2}$, sempre che la distanza non ecceda pochi centimetri.

È necessaria la forza di 58.000 volts per forare una lastrina di mica (combinazione di silicati di alluminio e di altri metalli). Questo grande potere isolante è dovuto non soltanto alla complessità delle molecole ma ancora alla loro aggregazione in numerosi strati adiacenti.

3. *Scarica attraverso i gaz.* — Quando un conduttore carico positivamente è collocato in vicinanza di un conduttore carico negativamente, nell'aria, le cariche opposte si portano alle superfici affacciate dei due conduttori. L'aria interposta non produce altro effetto che quello di ridurre leggermente la distanza fra i due conduttori a cagione dello spostamento delle cariche costituenti i suoi atomi neutri, producendosi una tensione degli elettroni verso il conduttore positivo e degli atomi positivi verso il conduttore negativo. Gli elettroni superflui nel metallo sono così imprigionati fra le molecole compatte del metallo, che nè la loro reciproca ripulsione, nè l'attra-

zione delle cariche opposte sul limite positivo possono trascinarli all'esterno nell'aria libera. Lo stesso avviene per gli atomi positivi superflui al limite positivo, colla sola differenza che essi vi sono trattenuti con forza molto più grande.

Perchè avvenga effettivamente una repulsione è necessaria l'azione di una forte energia.

Sostanze radioattive, come il radio e l'uranio, sono in tale stato di equilibrio instabile che in esse si producono sovente delle rivoluzioni atomiche in cui ora un elettrone, ed ora un atomo positivo sono lanciati nello spazio.

Ma le sostanze comuni richiedono o una temperatura molto elevata, o l'influenza della luce ultra-violetta, o il succedersi di urti degli ioni perchè questi possano sfuggire.

Avviene soltanto in circostanze eccezionali che la sola pressione data dalla sovrapposizione di cariche dello stesso nome sia sufficiente a espellere alcuni ioni da un conduttore.

Però sempre quando l'aria circostante sia ionizzata, cioè contenga molte particelle di cui ciascuna sia collegata ad un elettrone o ad un atomo positivo, gli ioni del conduttore urterebbero contro il limite carico di elettricità di segno contrario e spingerebbero o tirerebbero fuori del metallo la carica opposta.

Vi sono vari modi di ionizzare l'aria. Si può cioè riscaldarla semplicemente, o illuminarla con raggi ultra-violetti, o farla attraversare da raggi Röntgen o di Becquerel. L'energia così fornita si trasforma nell' energia potenziale necessaria

a produrre la ionizzazione. Ma poichè gli ioni tendono continuamente a ricombinarsi, così la ionizzazione deve venire mantenuta artificialmente.

Quando questo stato di cose è ottenuto, la scarica elettrica può aver luogo attraverso l'aria appunto come avviene attraverso a un conduttore metallico, cioè in forma di scarica calma e invisibile. La sola differenza è che l'abbassamento del potenziale non avviene in modo uniforme ma si verifica più rapido ai confini dove gli ioni di segno opposto si affollano di contro. Una scarica di questo genere dicesi « scarica dipendente » poichè il fatto dipende dalla sovvenzione costante di energia dall'esterno producente la necessaria ionizzazione.

Quando, per contro, la scarica fornisce essa stessa gli ioni necessari al suo svolgersi, noi abbiamo una « scarica indipendente » che si può ottenere in modi diversi.

L'esempio più comune è quello della lampada ad arco in cui le estremità dei carboni emettono vapori e forniscono la luce ultra-violetta necessaria alla ionizzazione.

Un altro esempio comune, il più antico che si conosca, è la scintilla elettrica insieme col suo naturale e grande competitore: il fulmine atmosferico. Queste due specie di scariche sono intermittenti, quasi senza eccezione, il fulmine stesso essendo formato da un succedersi rapido di lampi nella stessa direzione, preceduti soventi da una scarica-staffetta la quale passa da una

serie-strato di ioni ad un altro, seguendone esattamente la stratificazione in modo da segnare un cammino a zig-zag che viene seguito dalla scarica principale.

Le forme di scarica che permettono di seguire nel modo migliore lo svolgersi del fenomeno sono le scariche delle punte, dei pettini e le così dette scariche luminose, specialmente nei gaz rarefatti.

La forma più semplice di scarica nei gaz è la scarica che si produce fra una punta ed una lastra metallica. Supponiamo di collocare una punta acuminata P di fronte ad un disco metallico AB, nell'aria (fig. 11), e che la punta si trovi a potenziale negativo e la lastra a potenziale positivo. Se la differenza di potenziale è sufficiente, cioè di qualche centinaio di volts, allora si produce all'estremità della punta una scintilla luminosa.

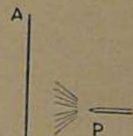



Fig. 11.

Questa scintilla in realtà è formata da due strati luminosi separati da uno stretto spazio oscuro. Per iniziare la scarica è necessaria la presenza di qualche atomo positivo isolato che viene attratto dalla punta ove si trova un'intensa forza elettrica concentrata. Il movimento di questi atomi positivi avviene con accelerazione costante e quando essi giungono molto vicini alla punta, la rapidità è tale che le molecole gas-

sose vengono spezzate nei loro ioni. Questa scissione è favorita dalla presenza del metallo che compie, a quanto pare, l'azione chiamata dai chimici « catalettica ».

La regione dove si produce questa scissione negli ioni è lo strato luminoso immediatamente aderente alla punta. Gli elettroni resi liberi nella ionizzazione vengono respinti dalla punta e si espandono per l'aria circostante. Anche il loro movimento è accelerato fino a che non acquistino energia sufficiente a ionizzare il gaz ed il loro campo di azione è determinato dall'apparire del secondo strato luminoso. Lo spazio oscuro interposto è chiamato « spazio oscuro catodico » ed è costituito dalla regione in cui gli ioni delle due specie stanno acquistando energia cinetica, ma non la consumano e quindi non possono produrre alcun effetto luminoso.

Questa doppia ionizzazione si verifica pure quando la punta sia caricata positivamente ed il disco negativamente. Però in questo caso lo spazio oscuro è più ristretto.

Quando la differenza di potenziale è molto grande, gli elettroni sfuggenti dalla punta negativa oltrepassano la regione di ionizzazione ed attaccano il gaz più vicino al disco ionizzandolo interamente e dando luogo al fenomeno noto sotto il nome di scarica a pennacchio. Ne sono una specie le scariche a guaina luminosa di Tesla e le scariche ottenute mediante l'interruttore di Wehnelt.

La forma di scarica che presenta la più grande

varietà di fenomeni è la scarica luminosa, come si può vedere nei tubi vuoti. È questa la forma di scarica che, dopo essere stata la fonte di tanti dubbi e di tante esitazioni, fu il mezzo che guidò alla dilucidazione del complicato problema delle scariche elettriche. La riduzione della pressione nei gaz facilita i movimenti dei ioni concedendo loro una « via libera » più lunga in cui essi possono seguire l'accelerazione del campo elettrico ed acquistare quindi energia cinetica. La ionizzazione ne risulta facilitata e la conduttività viene acquistata più rapidamente.

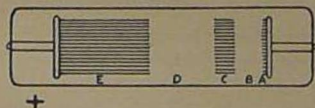



Fig. 12.

La lenta scarica in un tubo vuoto consiste comunemente di cinque parti distinte, cioè lo strato catodico A, lo spazio catodico oscuro B, il bagliore negativo C, lo spazio intermedio (1) D e la colonna positiva E (fig. 12). I tre strati luminosi (tratteggiati nel diagramma) sono quelli in cui si effettua la ionizzazione.

Essi sono la sede di collisioni e di lotte, e

---

(1) Questo spazio è noto anche sotto il nome di *spazio oscuro di Faraday*, da non confondersi collo spazio oscuro catodico. (N. d. T.).

gli altri spazi sono invece la sede della libera corsa lungo le linee di forza elettrica. Nello strato catodico A, gli atomi positivi ionizzano i gaz circostanti al catodo coll'aiuto del metallo e, come già nel caso della carica di una punta, gli ioni così formati seguono le forze elettriche e gli atomi positivi neutralizzano gli elettroni liberi al catodo, mentre gli elettroni attraversano lo spazio oscuro catodico per ionizzare gli atomi neutri nello strato C di gaz.

Quivi gli atomi positivi e gli elettroni sono posti in libertà e questi ultimi si portano ancora più innanzi verso l'anodo, producendo una ulteriore ionizzazione, non appena abbiano raggiunto una velocità sufficiente, risultandone la colonna luminosa positiva E. Talvolta accade che tutti gli elettroni, oltrepassato lo strato C, abbiano presso a poco la medesima velocità, cosicchè essi acquistano quasi contemporaneamente l'accelerazione necessaria a produrre la ionizzazione e sono quindi arrestati all'inizio della colonna positiva. Allora, prima che essi acquistino forza per la ionizzazione ulteriore, dovranno attraversare un altro spazio oscuro e così di seguito risultandone una colonna positiva stratificata di effetto meraviglioso quando si produce in un tubo lungo abbastanza. Se invece si accorcia il tubo, la colonna luminosa positiva viene gradatamente assorbita dall'anodo fino a tanto che la scarica diventa simile alle scariche ordinarie delle punte.

Abbiamo esposto a grandi tratti i principali feno-

meni delle scariche nei gaz. Essi però offrono infinite varietà e formano un campo di analisi e di studi proficuo di utili risultati. Quando si esperimenta con tubi in cui il vuoto fu ottenuto con grandissima approssimazione, i fenomeni che si producono sono altamente interessanti per la teoria degli elettroni, poichè gli elettroni proiettati dal catodo vi rappresentano una parte importantissima ed in certi casi esclusiva. Essi procedono dal catodo in linea retta, come i raggi luminosi, e sono perciò appunto denominati comunemente « raggi catodici ». Crookes fu il primo a formulare l'ipotesi che questi raggi potessero essere composti di materia (« materia radiante ») e noi ora sappiamo che essi risultano infatti dall'unione di particelle 200.000 volte all'incirca più piccole degli atomi ordinari, cioè dagli « elettroni ». Ma anche gli atomi positivi assumono l'apparenza di raggi.

Quando il catodo è forato, tali raggi sembrano emergere al di là d'esso e vennero chiamati « raggi-canali » (1) che consistono semplicemente di atomi positivi, o di aggregazioni atomiche e molecolari prive di elettroni.

Un fatto degno di nota nei fenomeni di scariche elettriche nei gaz si è che la quantità di elettricità in movimento (la « corrente ») non è, necessariamente, proporzionale alla differenza di potenziale fra gli elettrodi. Essa dipende dal grado di ionizzazione e questa è occasionata ed

(1) Fu il Goldstein il primo a designarli con questo nome.
(N. d. T.).

accresciuta dal passaggio della scarica stessa a cagione delle collisioni che avvengono fra gli ioni.

Infatti nelle « scariche dipendenti », in cui la ionizzazione è provocata da un agente esterno, la corrente non può mai eccedere un dato valore che è determinato dal numero di ioni che si producono. Quando tutti questi ioni sono occupati nel trasporto della corrente, anche una mutazione di potenziale non riesce a mutare la corrente. In tal caso esiste infatti una « corrente di saturazione » ; ciò non si verifica mai nel caso dei metalli, come vedremo più innanzi.

Le scariche attraverso alla fiamma sono una forma speciale di scarica attraverso i gaz e dipendono parimenti dal grado della ionizzazione prodotta naturalmente dall'elevata temperatura. Il calore esercita pure un'influenza sulle scariche che si producono dai metalli. Si trovò infatti che un filo di platino riscaldato si scarica più rapidamente di un filo freddo. Un filo di platino carico negativamente si scarica più prontamente quando sia immerso nell'idrogeno, essendo questo un gaz che abbandona facilmente i proprî elettroni. Questi circondano il filo negativo e ne traggono fuori gli elettroni. Quando un cilindro di platino riscaldato è caricato positivamente, e si fa in modo che l'idrogeno si diffonda intorno ad esso, gli atomi del gaz colle loro cariche positive liberano rapidamente il cilindro della sua carica positiva espandendola nello spazio circostante.

4. *Scariche attraverso i conduttori solidi.* — Nei gaz alla pressione ordinaria, o nel vuoto parziale, siamo in presenza di molecole che hanno una relativa libertà di movimento negli spazi intermolecolari, per quanto questi siano molto piccoli (circa $\frac{1}{100000}$ di cm.).

Nei metalli, per contro, gli atomi sono compatti e quanto sia grande la loro densità può essere trovato mediante un calcolo semplice. Un atomo di rame pesa 70×10^{24} gr. Un cm^3 di rame pesa 8,9 gr. Quindi in un cm^3 di rame sono contenuti $0{,}127 \times 10^{24}$ atomi, ciascuno dei quali avrà il volume di $7{,}9 \times 10^{-24}$ cm^3. Se un tale volume è rappresentato da un piccolo cubo, questo ha 2×10^{-8} cm. di lato. Questa lunghezza è appunto quella di una molecola di idrogeno, cosicchè riempiendo i piccoli cubi con molecole di idrogeno non si avrebbe alcuno spazio vuoto. Ma come si adatterebbero in questi piccoli cubi gli atomi del rame? Noi non ne conosciamo le esatte dimensioni ma possiamo dedurle con molta approssimazione. Possiamo ritenere che il diametro di una molecola di rame non è più grande del doppio del diametro di una molecola di idrogeno, poichè sappiamo che la molecola del mercurio è appena 1,7 volte quella dell'idrogeno. Quindi l'atomo del rame ha dimensioni pressochè eguali a quelle di una molecola di idrogeno e si adatterà esattamente nel piccolo cubo.

Gli atomi di rame sono quindi così compatti come possono esserlo, tanto che questo metallo

non può venire compresso sensibilmente. Ma tuttavia si spiega come gli elettroni liberi uniti agli atomi di rame possano obbedire all'impulso delle forze elettriche: infatti gli elettroni si portano spontaneamente nella zona neutra interposta fra gli atomi positivi vicini e sono ivi assoggettati alla sola influenza delle forze esterne. Questo spostamento delle forze degli elettroni si ripete, secondo i calcoli di J. J. Thomson, circa 40 milioni di volte al secondo per ciascun elettrone (per lo meno ciò si verifica nel bismuto). In conseguenza di ciò tutti gli atomi liberi in un metallo (intendo dire quegli elettroni che possono aderire ad un atomo od abbandonarlo senza produrre una carica sufficiente a interrompere il corso normale dei fenomeni) sono ad ora ad ora liberi di obbedire alle forze elettriche esterne. *Il movimento degli elettroni sotto l'influenza di queste forze costituisce la conduttività metallica.* Da questo fatto così semplice possono venire immediatamente ricavate le leggi più importanti relative alla conduttività dei metalli.

Schuster (1) ha calcolato che un metallo contiene da uno a tre elettroni mobili per ogni suo atomo. Noi possiamo quindi immaginare questi elettroni in corsa rapidissima fra mezzo agli atomi, avidi di obbedire all'attrazione di una forza elettrica, sempre quando essi siano liberi di farlo, il che avviene milioni di volte ad ogni

(1) Schuster, *Phil. Magazine*. Febbr. 1904.

secondo. Il passaggio libero per gli elettroni aumenta quanto più il metallo si raffredda e gli atomi si dispongono in più ampie aggregazioni. Perciò gli elettroni obbediscono più facilmente alle forze elettriche quando il metallo è freddo che quando è caldo.

Può a questo punto sorgere la domanda se gli atomi stessi obbediscano o no alle forze elettriche. La risposta è la seguente: gli atomi seguono l'impulso delle forze elettriche esterne quando sono uniti ad un numero più grande o più piccolo di elettroni che non siano allo stato neutro. Se gli atomi sono uniti ad un numero maggiore di elettroni essi possiedono una carica negativa, se ad un numero minore la loro carica è invece positiva. Nel primo caso essi tendono a seguire la direzione degli elettroni, mentre invece nel caso contrario essi tendono a spostarsi nella direzione opposta. Ma siccome essi sono un centinaio di migliaia di volte più grandi degli elettroni, essi si spostano per uno spazio minimo e, se si eccettuano casi eccezionali, il loro spostamento può venire trascurato e noi possiamo ritenere che i soli elettroni obbediscono all'attrazione delle forze elettriche, cioè che essi soli formano la « corrente elettrica » nei metalli. È evidente che essi procedono dal limite negativo al positivo e quindi in direzione opposta a quella che finora si ritenne come vera per la corrente elettrica. Questo fatto dà origine a gravi difficoltà rendendo necessario un radicale mutamento nella terminologia fino ad ora usata. Nè sarà

facile persuadere i profani a sacrificare tutta l'antica nomenclatura ed a capovolgere le loro nozioni antecedenti. I libri di testo basterebbero per loro stessi a rendere impossibile una tale rivoluzione. Ne risulta impellente la necessità di adottare termini tali che non possano dar luogo ad alcun equivoco. A questo scopo io propongo il nome di « corrente degli elettroni » per indicare il movimento degli elettroni. Ovunque io parlerò di « corrente » pura e semplice io farò allusione ad un movimento di cariche elettriche a prescindere dalla direzione delle stesse. Quando vorrò indicare una direzione dal limite positivo al negativo userò la locuzione di « corrente positiva ».

Quando la corrente non è il risultato del movimento di elettroni isolati ma di « ioni » — cioè di aggregazioni di atomi contenenti cariche positive o negative — avvengono in realtà due spostamenti in direzioni opposte, come nell'elettrolisi. Appare quindi come utile di indicare colle locuzioni: « corrente positiva » il flusso delle particelle cariche positivamente e « corrente negativa » il flusso delle particelle cariche negativamente. La corrente totale è la somma di queste due.

Ora che abbiamo risolto l'importante questione della terminologia possiamo procedere allo studio del misterioso fenomeno delle correnti elettriche nei metalli.

Per semplificare le cose supporremo, come dianzi, due lastrine metalliche infinite e parallele,

AC, BD, alla distanza di un cm. fra loro ed aventi una differenza potenziale tale che sia necessario il lavoro di 1 ergon $\frac{1}{(98.10^5}$ di chilogrammetro per trasportare una compagnia di elettroni o unità elettrostatica dalla piastra positiva alla negativa. Questa è l'unità elettrostatica della differenza di potenziale e può essere ottenuta praticamente congiungendo le due piastrine metalliche con gli estremi di una batteria di circa 300 Daniell. Introduciamo fra le due lastrine un cubo di rame di 1 cm. di lato che sia in contatto esatto colle due lastrine. Allora naturalmente i due quadrilioni di elettroni mobili contenuti nel centimetro cubo di rame si metteranno in movimento verso la piastrina positiva. Se essi potessero seguire liberamente le linee di forza, essi giungerebbero sulla lastra positiva colla velocità di 10^9 cm. al secondo, poichè la forza relativamente grande di una dina agisce per la lunghezza di 1 cm. sulla massa insignificante rappresentata da ciascuna compagnia di elettroni ($1{,}78 \times 10^{-18}$ gr.). Ciascuna compagnia che percorra tutto lo spazio di 1 cm. acquista l'energia di 1 ergon, ma poichè, in media, gli elettroni non percorrono che la metà di questa distanza, otteniamo la somma dell'energia acquistata dagli elettroni nel rame accorrenti alla lastra positiva moltiplicando il numero delle compagnie per $\frac{1}{2}$ erg. Il numero delle compagnie è di $6{,}5 \times 10^{14}$,

Fig. 13.

cosicchè l'energia acquistata da esse cadendo sulla lastra positiva è di 325 bilioni di ergon, quantità sufficiente a far evaporare parecchie centinaia di libbre d'acqua. E poichè questo primo procedimento avviene in $1,9 \times 10^{-9}$ di secondo, e si ripete prontamente per il sussidio di altri elettroni provenienti dalla piastra negativa, possiamo immaginare quale enorme sviluppo di energia avverrebbe fra le due piastre ove il cammino libero di ciascun elettrone avesse la lunghezza di 1 cm.; in altre parole, se la conduttività del rame fosse praticamente perfetta.

In realtà ciò non si verifica poichè due fattori concordano nell'impedire la produzione di una scarica libera. Anzitutto gli elettroni di quando in quando urtano contro atomi neutri solidamente riuniti, ed in tal caso, cioè quando un elettrone viene arrestato bruscamente, esso non può rimbalzare senza una perdita di energia, appunto come farebbe una palla perfettamente elastica o perfettamente rigida nell'urtare contro un'altra. Come vedremo più innanzi, l'accelerazione o il ritardo nel movimento degli elettroni è accompagnato dall'irradiazione luminosa, che significa appunto una perdita di energia. Esempio notissimo di radiazioni di questo genere sono i raggi di Röntgen, che risultano da onde propagate nell'etere quando le particelle catodiche, *alias* gli elettroni, urtano contro un ostacolo.

Riflettendo alla grande compattezza degli atomi si può ritenere che un elettrone perde quasi interamente la propria energia in forma di irra-

diazione sempre quando esso urta contro un atomo neutro. Se gli rimanesse una piccola parte di energia, esso girerebbe intorno all'atomo e durante questo movimento avverrebbe irradiazione col consumo conseguente dell'energia residua.

Altro fattore che impedisce la scarica libera degli elettroni è l'unione di un atomo positivo e di un elettrone che dura fino a che un urto non li separi. Fu calcolato che per ogni 5000 elettroni così collegati esiste un solo elettrone errante in qualsiasi istante. Possiamo quindi ritenere che soltanto $\frac{1}{5000}$ del numero totale di elettroni mobili rappresenta in un dato momento la conduttività del metallo.

Avevamo calcolato il numero totale degli elettroni mobili nel centimetro cubo di rame in 1,9 quadrilioni, di cui 380 milioni soltanto sono disponibili ad un dato momento per l'azione di conduttività. Poichè gli atomi successivi di rame si trovano in media ad una distanza di 2×10^{-8} cm. fra loro, possiamo supporre che ciascun elettrone venga arrestato ogni volta che ha percorso questa distanza. Così stando le cose, quanto tempo impiegherà l'elettrone a percorrere la distanza di 1 cm. che separa le due piastre?

Si può dimostrare facilmente che il tempo aumenterà in proporzione della radice quadrata del numero delle fermate.

Infatti, per la nota legge dei corpi cadenti si ha:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}}.$$

Supponendo quattro suddivisioni del cammino $s = \frac{1}{4}$ e $t\frac{1}{2}$, il tempo totale sarà di

$$4 \times \frac{1}{2} = 2.$$

Ora, siccome nel caso nostro vi sono $0{,}5 \times 10^8$ di tali « suddivisioni », il tempo sarà aumentato

$$\sqrt{0{,}5} \times 10^4 \text{ volte} = 0.71 \times 10^4 = 7100.$$

Il tempo richiesto per la caduta libera era di $1{,}9 \times 10^{-9}$ secondi, quindi il tempo necessario all'elettrone per compiere il suo cammino nel rame sarà di

$$7000 \times 1{,}9 \times 10^{-9} = 1{,}35 \times 10^{-5} \text{ secondi.}$$

In così breve tempo tutti gli elettroni mobili liberi, in numero di 380 trilioni, saranno passati dal rame alla lastra positiva e altri elettroni forniti della lastra negativa avranno preso il posto dei primi. In un secondo non meno di

$$\frac{380 \text{ trilioni}}{1{,}35 \times 10^{-5}}$$

elettroni passeranno attraverso a ciascuna sezione trasversale del conduttore formando la corrente degli elettroni. Essa è eguale, quanto alla quantità elettrica, alla corrente ordinaria o positiva ma è di segno opposto. Misurata praticamente essa risulta di circa 3.000.000 ampères, corrente di intensità tale da fondere ed evaporare il rame in una frazione di secondo (1).

(1) La corrente calcolata dell'osservazione delle resistenze risultò di 188 milioni di ampères, cosicchè gli elettroni non sono arrestati così sovente, come abbiamo supposto.

La proprietà per cui un conduttore assorbe l'energia cinetica degli elettroni e la converte in calore è detta la « resistenza » del conduttore.

La corrente, ossia l'energia della corrente, è misurata dal numero di elettroni che attraversa una sezione qualsiasi del conduttore nell'unità di tempo.

Si può definire l'unità di corrente come il passaggio di una compagnia di elettroni al secondo attraverso ad una sezione trasversale del conduttore. Ma una tale corrente sarebbe eccessivamente piccola e potrebbe venire misurata con difficoltà dagli strumenti ordinarî. Abitualmente si misurano le correnti in « ampères » o « coulombs » per secondo. Un coulomb consiste di 3×10^9 compagnie o $8,7 \times 10^{18}$ elettroni.

Seguendo sempre il principio di una esposizione figurativa della natura atomica dell'elettricità, io chiamerò ogni « coulomb » un' « armata » di elettroni (o di atomi positivi), avvertendo che ciascun' armata consta di 8,79 trilioni di individui e può venire suddivisa in 3000 milioni di compagnie.

Quando un'armata di elettroni attraversa una sezione qualsiasi del conduttore in un secondo, quel conduttore è percorso da un'unità di corrente, cioè da un « ampère ».

Le quantità di elettricità che passano in ciascuna sezione sono uguali; infatti, se da una sezione uscisse una quantità minore di elettricità di quella che entrò in un'altra sezione, il metallo fra le due sezioni accumulerebbe elettricità, ma tale

accumulo sarebbe rapidamente scacciato dalla ripulsione reciproca delle cariche.

Le quantità di elettricità di cui si tratta in relazione colla conduttività dei metalli, sono assai più grandi di quelle che risultano dalle cariche elettrostatiche. In queste, come abbiamo veduto, non si può praticamente ottenere più di un milionesimo dell'energia totale sotto forma di cariche libere. Ma nell'interno di un metallo scarico ciascun elettrone libero è compensato da un atomo positivo ed è libero di spostarsi, quantunque esso non rappresenti una carica elettrostatica misurabile dall'esterno.

Proseguiamo ora a considerare la corrente in circostanze diverse.

Supponiamo che nel cubo di rame la corrente venga ridotta di 1000. Ciò significa che soltanto un millesimo del numero degli elettroni raggiungerà la lastra positiva ad ogni secondo. Ma significa ancora che la velocità media costante di ciascun elettrone — in realtà il rapporto del suo lavoro alla resistenza del conduttore — è ridotto della stessa proporzione. In ciascuna unità di volume del conduttore il rapporto in cui l'energia si trasforma in calore verrà ridotto nella proporzione di $1 : 1000^2$ o di 1 : un milione. E, in generale, il calore sviluppato per ciascuna unità di volume nell'unità di tempo è *proporzionale al quadrato dell'intensità della corrente* (legge di Joule).

Se, d'altra parte, noi riduciamo la differenza di potenziale fra le piastre a $\frac{1}{1000}$ del suo va-

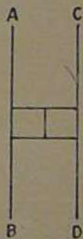
lore precedente, noi riduciamo di altrettanto la forza agente negli elettroni e la media della loro velocità costante e rapporto di lavoro saranno ridotti a $\frac{1}{1000}$. Per ogni mille elettroni che attraversavano dianzi la regione trasversale ne passerà ora uno solo.

L'intensità della corrente in un conduttore è quindi *proporzionale alla differenza di potenziale dei suoi estremi* (legge di Ohm).

Ora supponiamo di avere due cubi di rame invece di uno solo. Siccome abbiamo supposto le piastre infinite e contenenti una riserva tale di elettroni da sopperire a qualsiasi richiesta, si formeranno due correnti eguali e la corrente totale risulterà doppia di quanto era prima. Seguendo il ragionamento, noi vediamo che la corrente è *proporzionale alla superficie della sezione del conduttore*.

A C B D

Fig. 14.

Supponiamo ora che due cubi di rame vengano collocati uno dietro all'altro (fig. 14) così che la corrente li attraversi successivamente, e manteniamo invariata la differenza di potenziale. Affinchè questo possa avvenire dobbiamo ridurre alla metà la densità superficiale dell'elettricità sulle piastre, cosicchè la forza sarà dimezzata, come pure la velocità costante degli elettroni. Ne consegue che anche la corrente avrà un valore metà del precedente e

se aumentiamo di n volte la lunghezza del conduttore, dovremo anche ridurre la corrente di n volte. Cioè la corrente è *inversamente proporzionale alla lunghezza del conduttore*, rimanendo invariate le altre circostanze.

Se, mantenendo sempre le piastre alla stessa distanza, noi le uniremo mediante un conduttore obliquo (fig. 15), noi dovremo ridurre la forza effettiva sugli elettroni nella stessa proporzione in cui venne aumentata la lunghezza del conduttore, e quindi dovremo pure ridurre la corrente in eguale proporzione, cosicchè anche in questo caso la corrente è inversamente proporzionale alla lunghezza del conduttore.

Fig. 15.

La forma geometrica del conduttore non è tuttavia il solo fattore che possa modificare una corrente. Se a un'asta di rame venisse sostituita un'asta di ferro d'identiche dimensioni, il valore della corrente diverrebbe un sesto del valore precedente. La proprietà per cui un metallo conduce l'elettricità meglio di un altro dicesi la conduttività (specifica) di esso. La proprietà inversa è detta resistenza specifica (1). La resistenza effettiva di un'asta metallica a sezione uniforme

(1) Vi è chi chiama la conduttività specifica: *conduttanza* e la resistenza specifica: *resistività*.

(N. d. Tr.).

si calcola moltiplicando la resistenza specifica di esso per la sua lunghezza e dividendo questo prodotto per l'area della sezione.

La resistenza di un corpo può venire misurata calcolando l'ammontare dell'energia che si trasforma in calore quando esso viene attraversato da una corrente di un ampère per lo spazio di un secondo. In un conduttore di ferro si sviluppa una quantità di calore sei volte più grande che in un conduttore di rame. La resistenza opposta da un filo di ferro lungo 1 cm. è quindi equivalente a quella opposta da un filo di rame di eguale diametro, ma lungo 9 cm., e cioè se riuniamo per due estremi un filo di ferro ed un filo di rame, lunghi 1 cm. ciascuno, e li facciamo attraversare da una corrente, otteniamo lo stesso risultato che si otterrebbe se la stessa corrente attraversasse un filo di rame della lunghezza di 7 cm. In altre parole, la resistenza di due conduttori successivi è eguale alla somma delle resistenze degli stessi conduttori presi separatamente, e l'effetto della corrente varia in proporzione.

Possiamo ora formulare la legge di Ohm. Se la differenza di potenziale agli estremi di un conduttore o di un sistema di conduttori successivi è costante, la corrente che percorre il conduttore o il sistema di conduttori è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale ed inversamente proporzionale alla resistenza fra le estremità.

La legge sopra esposta vale, naturalmente, solo per quei casi in cui il numero delle parti-

celle che formano la corrente sia costante. Nel caso di scariche che avvengono nei gaz, la ionizzazione, come abbiamo visto, si produce continuamente, cosicchè la corrente cresce sovente con rapidità assai più grande che la differenza di potenziale.

Nei metalli, tutti gli elettroni separabili possono essere considerati come conduttori, quantunque, una gran parte di essi si trovi temporaneamente collegata agli atomi in un dato istante. Un aumento nella differenza di potenziale non modifica il processo di ionizzazione nei metalli, poichè la ionizzazione in essi è totale allo stato naturale.

Quando una corrente percorre un conduttore ramificato, la corrente che procede verso il punto di ramificazione deve essere eguale alla somma delle correnti che si allontanano dal punto stesso. Se fosse altrimenti si verificherebbe un accumulo di elettroni o di atomi positivi nel punto di ramificazione. Quando parecchi conduttori si riuniscono in uno stesso punto, la somma delle correnti dirette verso quel punto è eguale alla somma delle correnti che si allontanano da esso. Questa è la prima legge di Kirchhoff.

La corrente si comporta dunque, apparentemente, come un fluido incompressibile. In realtà l'elettricità è un fluido, e più precisamente un gaz che in molti metalli raggiunge la pressione di parecchie migliaia di atmosfere, ed ha la medesima temperatura dei corpi circostanti. La caratteristica che lo distingue dagli altri gaz è la enorme forza di espansione che

esso possiede, prescindendo dalla sua temperatura. I gaz ordinari, quando sono privati del loro calore, vengono privati contemporaneamente della loro forza di espansione. Ma il gaz elettrico, formato dalla riunione di elettroni, ha un'enorme forza esplosiva anche alla temperatura dello zero assoluto.

Considerata come un fluido, neanche l'elettricità può dirsi perfettamente incompressibile. Essa può venire compressa di una proporzione eguale ad un milionesimo all'incirca, come avviene, p. es., quando si carica un conduttore con una forte carica negativa. Questo però è il limite massimo di compressione dell'elettricità, ed è tale da non poter essere rilevato dagli strumenti ordinari.

Negli esperimenti immaginari sopra accennati non ho mai specificato il modo in cui possono venire caricate le piastre indefinite AB e CD, perchè ciò non modifica i risultati. Possiamo ora sostituire alle lastre metalliche infinite una macchina elettrostatica di qualsiasi specie, capace di svolgere il necessario numero di elettroni o di atomi positivi. Supponiamo che questa macchina fornisca alla lastra N un numero sufficiente di elettroni per mantenerla ad un potenziale (negativo) di un volt, e ritolga contemporaneamente un numero corrispondente di elettroni da M mantenendo M al potenziale della terra; la macchina dovrà compiere un certo lavoro per trasportare gli elettroni negativi da M in N. Questo lavoro sarà eguale ad 1 erg per ogni « compagnia » o

« coulomb » di elettroni; ed è chiamato la « forza elettromotrice » (1) della macchina elettrica.

Supponendo che non vi sia alcuna perdita di lavoro nel trasporto dell'elettricità da M in N, la forza elettromotrice sarà eguale alla differenza di potenziale fra M ed N, poichè esso rappresenta la quantità di energia che può essere ottenuta in forma di calore da ciascuna unità di elettricità percorrente il filo che congiunge questi

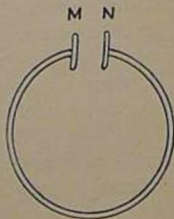



Fig. 16.

due punti. Ma la macchina elettrica operando in modo che non tutto il suo lavoro si trasforma in energia potenziale, poichè una parte di esso va perduta nel superare le resistenze, la corrente diminuisce proporzionalmente a questa resistenza

(1) Questo termine "forza„ non è appropriato poichè in realtà non si tratta qui di una forza nè di un lavoro, bensì di un lavoro corrispondente ad una data quantità di elettricità. Altri termini come "tensione„ e "pressione„ sono egualmente improprii. Attendiamo tuttora una parola esatta.

ed il lavoro addizionale è dato dalla differenza di potenziale utile fra M ed N. La forza elettromotrice della macchina non è più eguale alla differenza di potenziale fra M ed N, ma è più grande di questa differenza.

La legge di Ohm comprende anche questo caso, cioè la « resistenza interna ». Infatti essa stabilisce che la corrente è in ogni caso proporzionale alla forza elettromotrice totale (sia essa dovuta ad una sola macchina o a più macchine riunite in serie) ed inversamente proporzionale alla resistenza totale.

Un apparecchio come quello accennato dianzi comprendente una macchina elettrica o altra sorgente elettromotrice, ed un conduttore che ne riunisca gli estremi, dicesi un « circuito elettrico ». Poichè l'elettricità non può crearsi nè distruggersi, vi deve essere in ogni caso una circolazione di elettricità e se vi è un flusso continuo tale flusso deve in definitiva costituire un circuito.

La corrente in un circuito può venire calcolata in modo assai semplice partendo dalla legge di Ohm. La forza elettromotrice si misura in volts, ciascuno dei quali è $\frac{1}{300}$ di un'unità elettrostatica misurante la differenza di potenziale (1 erg. per compagnia).

La corrente si misura in ampères o coulombs per secondo. La resistenza ha per unità di misura un « ohm » cioè la resistenza opposta da un conduttore di mercurio puro misurante 1 mm^2 di area della sezione e mm. 1063 di lunghezza.

La resistenza di qualsiasi altro conduttore può venire calcolata in base alla sua dimensione e alla sua resistenza specifica. Ottenuto questo valore, la corrente è data dall'equazione:

$$\text{Corrente in ampères} = \frac{\text{forza elettromotrice in volts}}{\text{resistenza in ohms}}$$

ovvero

$$C = \frac{E}{R}.$$

5. *Scarica nei liquidi.* — *Elettrolisi.* — Consideriamo ora il caso in cui il circuito metallico percorso da corrente eccitata da una macchina elettrica venga interrotto in un punto e debba completarsi con un mezzo liquido. Se il circuito è formato da un solo metallo e si inserisce in esso un solo liquido, possono prodursi due fenomeni: *a*) la corrente non passa; *b*) la corrente passa. Il primo di questi due casi si verifica quando il liquido è un isolatore, come l'olio; il secondo quando il liquido interposto contiene degli ioni.

L'acqua pura in pratica non contiene ioni, essa è quindi un isolatore pressochè perfetto. Ma questo liquido possiede in modo assai notevole la proprietà di scomporre nei loro ioni le molecole di altre sostanze. Così se l'acqua contiene acido cloridrico (HCl) quasi tutte le molecole dell'acido vengono scomposte nei loro ioni, cioè negli atomi di idrogeno e di cloro.

E, precisando meglio, se una quantità d'acqua contiene il 0,0036 per cento di acido cloridrico,

il 99 per cento del numero delle sue molecole verrà scomposto (o « dissociato » o « ionizzato ») in H e Cl, e l'uno per cento che rimane sarà presente tuttora in forma di HCl. Questa ipotesi, la quale differisce assai dalle antiche convinzioni riguardanti la costituzione di un gaz diluito, è detta l'ipotesi della « ionizzazione » o « dissociazione » ed è stata elaborata essenzialmente dal celebre fisico svedese Arrhenius. Fu questa l'ipotesi che per la prima accolse la concezione di una struttura atomica dell'elettricità, come si vede dalle leggi di Faraday sull'elettrolisi.

Dalla percentuale sopra citata di acido non dissociato, non bisogna dedurre che la dissociazione sia permanente in modo assoluto; infatti gli ioni di segno contrario si attraggono reciprocamente con la forza di $(3{,}4 \times 10^{-10})^2$ dine quando siano collocati alla distanza di 1 cm. e deve perciò accadere che questi ioni talvolta si incontrino e uniscano malgrado la resistenza dell'acqua circostante e la efficacia della sua azione nel decomporre le molecole di altri corpi. Nella soluzione che abbiamo sopra supposto per ogni molecola di acido cloridrico vi sono circa 50.000 molecole di acqua e la potenza di dissociare le molecole dell'acido proprio dell'acqua è tanto grande che una sola molecola su cento sfugge alla dissociazione. Quindi se due ioni dell'acido risultante da un atomo di idrogeno che ha perduto un elettrone e da un atomo di cloro che l'ha acquistato, si incontrassero e si riunissero,

essi non tarderebbero molto a venire di bel nuovo dissociati. Possiamo supporre che tutti gli ioni si incontrino e si uniscano con altri, ma che per ogni secondo per cui essi rimangono trattenuti nella combinazione, essi rimangano durante un minuto e trentanove secondi separati, cosicchè, complessivamente, su 100 ioni ve ne sono sempre 99 dissociati.

Questo stato di cose è radicalmente diverso da quello che si verifica per i metalli dove (come abbiamo veduto sopra per il rame) ciascun elettrone rimane combinato con un atomo positivo per un tempo 5000 volte più grande di quello nel quale esso erra liberamente. Da questo confronto parrebbe potersi dedurre senz'altro che la conduttività del rame è 5000 volte minore di quella di una soluzione diluita di acido cloridrico; questa conclusione sarebbe però completamente errata. Anzitutto dobbiamo ricordare che la conduttività del rame non è dovuta ai suoi atomi carichi bensì ai suoi elettroni liberi, i quali sono un centinaio di migliaia di volte più piccoli e quindi assai più mobili degli atomi carichi. E non solo gli elettroni hanno dimensioni minori ma la massa di un elettrone è ancora circa mille volte più piccola di quella di un atomo di idrogeno, cosicchè la stessa forza produrrebbe su di esso un'accelerazione mille volte maggiore di quella che produrrebbe su un atomo di idrogeno. Una forza elettromotrice che in un metallo farebbe muovere l'elettrone colla velocità costante di circa un chilometro al secondo, sarebbe ap-

pena sufficiente per impartire al ione di idrogeno in soluzione acquosa la velocità di $\frac{1}{300}$ cm. per secondo. Poichè il valore della carica elettrica è eguale in entrambi i casi, le correnti avranno valori estremamente diversi, la conduttività del rame essendo assai superiore.

Possiamo ora esaminare in tutti i suoi partiticolari il modo di comportarsi di un cubo di soluzione diluita di acido cloridrico avente 1 cm. di lato, introdotto fra due lastre conduttrici infinite mantenute alla differenza di potenziale di 1 volt ($= \frac{1}{300}$ di unità elettrostatica). Il peso può essere calcolato in un gramma, essendo il peso specifico della soluzione pressochè eguale a quello dell'acqua. Quanto alla sua struttura molecolare essa consiste di molecole di acqua H_2O, di molecole di acqua dissociate, $H + HO$, di molecole dissociate di acido cloridrico, $H + Cl$, e di molecole di acido cloridrico non dissociate HCl. Se la concentrazione dell'HCl è di un millesimo di « molecola-grammo » per litro (1), ossia un millesimo della concentrazione « nor-

HCl

+ −

Fig. 17.

(1) Si dice che una soluzione contiene una " molecola-grammo " per litro quando essa contiene M grammi per litro, M essendo il peso molecolare della sostanza disciolta. Il peso molecolare dell'HCl essendo $35,5 + 1 = 36,5$

male » la percentuale dell'HCl in soluzione sarà di 0,00365. Possiamo quindi fare un elenco delle molecole e dei ioni contenuti in ogni centimetro cubo di soluzione.

Molecole neutre di acqua H_2O . .	5×10^{22}
Totale molecole di acido	$1{,}81 \times 10^{18}$
Molecole dell'acido dissociate H + Cl	1.8×10^{18}
" " indissociate HCl .	2×10^{16}
" dissociate di acqua H + HO	10^{14}.

Fra questi vari costituenti soltanto gli ioni dissociati hanno parte attiva per il trasporto dell'elettricità; di questi ioni ve n'è uno derivato dall'acqua su ogni 18.000 derivati dall'acido. Cosicchè in pratica il trasporto dell'elettricità nella soluzione è affidato ai soli ioni di idrogeno e di cloro.

Questi ioni devono essere presenti in numero eguale perchè altrimenti la soluzione conterrebbe una carica. Così se vi fossero 1.000.001 ioni di idrogeno per ogni 1.000.000 ioni di cloro, la soluzione avrebbe una carica equivalente a 310 compagnie il che le attribuirebbe un potenziale superiore a 100.000 volts. Su $1{,}8 \times 10^{18}$ ioni di idrogeno e cloro dobbiamo quindi averne $0{,}9 \times 10^{8}$ di idrogeno e un numero eguale di cloro. Ciascun ione di idrogeno ha una carica positiva uguale a quella di un atomo positivo e

---

il peso in un litro d'acqua deve essere di 36,5 gr. per formare una soluzione " normale " di una " molecola-gramma ». L'acqua pesando 1000 gr., la percentuale è di 3,65.

ciascun ione di cloro ha una carica negativa eguale a quella di un elettrone. Un ione semplice di idrogeno è un atomo positivo — cioè un atomo privato di un elettrone. Un ione semplice di cloro è un « atomo negativo », cioè un atomo provvisto di un elettrone in eccedenza. Ma questi atomi così carichi non percorrono l'acqua isolati, ed i loro movimenti, sotto l'influenza di una forza elettrica, sono così lenti, che la sola spiegazione possibile per tale lentezza sembra essere quella che essi sono uniti a parecchie molecole neutre di acqua che agiscono come ritardatori e ostacolano il progredire degli atomi nell'acqua. Questi atomi sono per così dire « idratati »; gli atomi di cloro sono idratati in proporzione quattro o cinque volte più grande che non quelli di idrogeno e procedono quindi con una velocità che è quattro o cinque volte minore. Se così non fosse in realtà, sarebbe impossibile spiegare la lentezza del movimento degli ioni, le molecole dell'acqua avendo una compattezza due volte minore di quella delle molecole del rame; fra esse esiste spazio in abbondanza cosicchè gli atomi di idrogeno, quantunque siano assai più grandi degli elettroni, avrebbero un percorso libero di ostacoli relativamente lungo se si muovessero isolatamente. Così come stanno le cose, gli ioni di idrogeno sono i più rapidi di tutti quelli conosciuti fino ad ora; seguono immediatamente gli ioni della combinazione HO i quali, tuttavia, hanno una velocità metà di quella degli ioni di idrogeno. La grande mobilità di

questi costituenti dell'acqua vale a spiegare parecchie di quelle qualità caratteristiche che fanno di questo liquido il principale veicolo nello svolgimento del processo della vita.

Questa velocità è una quantità costante per ciascun ione alla medesima temperatura, qualunque sia il corpo composto da cui esso deriva e qualunque sia il grado della sua idratazione (il cui valore assoluto sarebbe assai difficile a calcolarsi). La mobilità del ione è sempre la stessa ad una data temperatura ed è misurata dalla velocità costante che esso acquista se viene assoggettato all'influenza di un « campo » di un volt per centimetro, cioè un campo elettrico in cui il potenziale varia di un volt per ogni centimetro percorso nella direzione della forza.

Arrhenius nel suo « Textbook of Electrochemistry » (Libro di testo per l'elettrochimica) dà la tavola che riportiamo qui in appresso per le velocità assolute degli ioni più comuni ad una temperatura di 18°, sotto l'influenza di una caduta di potenziale di un volt per centimetro:

Cationi		*Anioni*	
H . . .	3250×10^{-6}	OH . .	1780×10^{-6}
K . . .	670 "	Cl . . .	678 "
Na . . .	451 "	I . . .	685 "
Li . . .	347 "	NO_3 . .	640 "
NH_4 . .	660 "	CH_3CO_2 .	350 "
Ag . .	570 "	$C_2H_5CO_2$.	320 "

I « cationi » sono quei ioni che assumono una carica positiva (cioè perdono un elettrone) e si dirigono al catodo o lastra negativa. Gli « anioni »

sono quelli che assumono una carica negativa — cioè un elettrone in eccedenza — e si portano all'anodo o lastra positiva.

« Da questi dati possiamo calcolare », dice Arrhenius, « la forza meccanica necessaria a trasportare un « ione-gramma » (1) attraverso l'acqua con una velocità determinata. Il volt è definito come la differenza di potenziale che si può far risalire di un coulomb impiegando il lavoro di 10^7 ergon. Inversamente se la caduta di potenziale è di 1 volt per centimetro, sono richieste 10^7 dine-cm. (ergon) per trasportare un coulomb per 1 cm. in opposizione a queste forze — cioè la forza necessaria per 1 coulombs è di 10^7 dine = 10,18 chilogrammi. La forza necessaria per trasportare 1 ione-gramma carico di 96,500 coulombs in opposizione alla stessa differenza di potenziale è quindi di:

$$96.500 \times 10{,}18 = 983.000 \text{ kg.}$$

« Questa forza trascina un « ione-gramma » di idrogeno colla velocità di 325×10^{-5} cm. al secondo. Affinchè la velocità sía di 1 cm. al secondo la forza deve essere di

$$\frac{983.000 \times 10^5}{325} = 302 \times 10^6 \text{ kg.}$$

« La seguente tavola contiene in milioni di kg.

(1) Un " ione-gramma „ contiene tanti grammi della sostanza quante volte il peso del ione semplice supera quello dell'atomo di idrogeno. In altre parole, è sempre composto di 0,9 quadrilioni di ioni.

la forza necessaria a trasportare nell'acqua a 18° un « ione-gramma » per la durata di un secondo:

K	1467	Cl	1450
Na	2180	I.	1435
Li	2833	NO_3	1536
NH_4	1490	OH	552
H	302	CH_3CO_2 . . .	2810
Ag	1725	$C_2H_5CO_2$ . . .	3110

« Da questi numeri si vede quali enormi forze meccaniche si richiedano per trasportare gli ioni nel solvente con una velocità apprezzabile. Se la temperatura aumenta, questi valori, che sono dipendenti dall'attrito, diminuiscono in proporzione pressochè eguale all'accrescersi della mobilità degli ioni — per la maggioranza degli ioni in ragione del 2,5 % per ogni grado di temperatura.

« L'attrito elettrolitico degli ioni è maggiore in solventi diversi dall'acqua. Se si aggiunge all'acqua una piccolissima quantità di un altro corpo non conduttore, l'attrito degli ioni aumenta in modo notevole e conseguentemente diminuisce la conduttività della soluzione allo stesso modo in cui varia l'attrito interno del liquido per l'addizione avvenuta e cioè l'azione di sostanze estranee sull'attrito interno del liquido procede quasi parallela all'azione sull'attrito elettrolitico. Io ho potuto verificare che l'aggiunta dell'1 % in volume di alcool, etere, acetone o zucchero di canna fa crescere l'attrito interno come pure l'attrito elettrolitico degli ioni più comuni a 25° in corrispondenza dei valori sopra esposti. Se si aggiungono quantità maggiori si verifica un au-

mento proporzionale nell'attrito elettrolitico, e in pari tempo una diminuzione nel grado di dissociazione dell'elettrolito, specialmente quando si adoperi una soluzione concentrata ».

Queste osservazioni dell'illustre svedese dimostrano che i due fattori determinanti la conduttività (cioè la densità degli ioni e la loro mobilità) vengono entrambi modificati dalle sostanze capaci di accrescere la vischiosità della soluzione. Ma finchè tali sostanze non sono presenti, il fattore più importante della conduttività, cioè la mobilità dei singoli ioni si può ritenere come costante.

Stabilite queste premesse, possiamo ora calcolare la quantità di corrente elettrica che attraverserà un centimetro cubo della soluzione diluita che abbiamo dianzi preso in esame. Questa corrente consiste di due flussi di materia elettrizzata. Uno di essi è la corsa di ioni positivi H verso il catodo, e l'altro è la corsa di ioni negativi Cl verso l'anodo. Se supponiamo di sezionare in un punto qualunque il percorso delle correnti, un certo numero di ioni H passerà per questo punto ad ogni secondo in direzione costante mentre un numero minore di ioni Cl passerà in direzione opposta. La somma di questi due numeri è la corrente elettrica.

I due flussi hanno per risultato un accumulo di atomi H al catodo e di atomi Cl all'anodo. Ma per il primo secondo in ogni caso quest'accumulo è minimo, tanto da poter essere trascurato, come pure l'esaurimento degli atomi H nelle

vicinanze dell'anodo. Supponiamo per ora che tutti gli elettroni siano in movimento.

Il numero totale di ioni H essendo $0,9 \times 10^{18}$ e la loro mobilità 0,00325, la proporzione in cui essi attraverseranno ciascuna sezione sarà di $0,9 \times 10^{18} \times 0,00325$ al secondo ossia $2,77 \times 10^{15}$ ioni al secondo. Poichè 1 ampère è una corrente di $8,79 \times 10^{18}$ elettroni al secondo, la corrente sopra indicata è equivalente a $3,15 \times 10^{-4}$ ampère. Questa è la corrente positiva. La corrente negativa è formata dagli ioni di cloro in numero di $0,9 \times 10^{18}$ aventi una velocità di 0,00068 cm. al secondo. La corrente dovuta a questi ioni è quindi di $0,9 \times 10^{18} \times 0,00068$ elettroni o $0,61 \times 10^{15}$ elettroni al secondo, quantità che corrisponde a $0,69 \times 10^{-4}$ ampère.

Otteniamo cioè come risultato definitivo:

Corrente positiva	$3,15 \times 10^{-4}$ ampère
» negativa	$0,69 \times 10^{-4}$ »
Corrente totale	$3,84 \times 10^{-4}$ »

o circa un terzo di millampère.

Il risultato di questo calcolo è completamente confermato dalle esperienze e fornisce un esempio efficacissimo del come la teoria dell'elettricità può venire applicata per spiegare i fenomeni che avvengono realmente nella cellula elettrolitica. La evidenza della teoria applicata alla spiegazione di questi fatti è dovuta alla costanza dei numeri di ioni dissociati in ogni soluzione. Questa cognizione però non si estende nè ai metalli nè ai gas e non possiamo quindi fare un calcolo

così preciso per questi corpi. Dal punto di vista della scienza dell'elettricità le soluzioni diluite sono le sostanze meglio determinate.

Il calcolo fatto sopra ci può dare anche la resistenza, la resistenza specifica, la conduttività e la conduttività specifica della soluzione.

Si dice che un corpo presenta la resistenza di un ohm quando una forza elettromotrice di un volt applicata ai suoi estremi produce nel suo interno la corrente di un ampère. La corrente nel caso nostro essendo soltanto di $3{,}84 \times 10^{-4}$ ampère, la resistenza è corrispondentemente più grande, ed ammonta a

$$\frac{10^4}{3{,}84} = 2600 \text{ ohms.}$$

Questo è adunque il valore della resistenza specifica dell'elettrolito, poichè questa è definita come la resistenza di 1 cm^3. La conduttività è il valore reciproco, cioè $3{,}84 \times 10^{-4}$.

Se ora aumentiamo la concentrazione della soluzione, aumenteremo pure la sua conduttività poichè si aggiungerà ad essa un numero ulteriore di ioni. Ma l'aumento della conduttività non è proporzionale alla concentrazione perchè gli ioni si dissocieranno in numero sempre minore. Con una molecola-gramma di HCl per litro, il grado di dissociazione sarà soltanto del 59 % invece che del 99 come dianzi. Vi sarà un numero mille volte più grande di molecole, ma la conduttività crescerà soltanto nella proporzione di 59000 : 99, ossia 596 : 1. Sarà quindi $596 \times 3{,}84$

$\times 10^{-4}$, ossia 0,22, cosicchè la corrente sarà soltanto di un quinto di ampère.

Occupiamoci ora di quanto avviene in seguito agli elettrodi. Gli atomi H giungono alla lastrina positiva la quale contiene un gran numero di elettroni disposti ad abbandonare il metallo per la soluzione, al minimo impulso. Questo impulso è dato dagli ioni H i quali, avendo perso ciascuno un elettrone, sono carichi positivamente ed attraggono gli elettroni estraendoli dal metallo. Quando questo fatto si verifica l'atomo positivo di idrogeno diventa un atomo neutro. Esso abbandona immediatamente le molecole d'acqua che gli si fossero attaccate quando era carico, attratte da una forza finora ignota, e diventa un gas ordinario che, accumulandosi, acquista una pressione tale che l'acqua non può più contenerlo in soluzione cosicchè esso sfugge in forma di bolle.

Nel frattempo si verifica all'anodo il procedimento inverso. Il ione di cloro avendo un elettrone in eccedenza lo abbandona all'attrazione della lastrina carica positivamente, la quale ha un numero scarso di elettroni, e l'atomo di cloro diventa un atomo ordinario di gas cloro allo stato neutro. Ma poichè l'acqua discioglie una quantità assai maggiore di cloro che di idrogeno, il cloro resta in soluzione e si porta gradatamente dall'anodo al catodo. In ogni caso si verifica uno sviluppo di idrogeno al catodo e di cloro all'anodo. L'acido cloridrico originario si è così scomposto nei suoi costituenti in questo procedimento, che dicesi di « elettrolisi ».

La « prima legge dell'elettrolisi », di Faraday, dice che *la quantità di materia decomposta è proporzionale alla quantità di elettricità che la attraversa*. La evidenza di questa legge è provata dalla natura stessa del procedimento che si compie: dobbiamo però ricordare che non si deve confondere la dissociazione colla decomposizione dei corpi. Dalla prima risultano ioni carichi, dalla seconda atomi e molecole. Ciascun ione avendo una carica eguale ad un elettrone, o corrispondente alla mancanza di un elettrone, dovrà ricevere un elettrone dal catodo o cederlo all'anodo prima di diventare un atomo neutro. I due processi richiedono entrambi la corsa di un elettrone nella medesima direzione e quindi « il passaggio di una quantità determinata di elettricità ». Nella teoria degli elettroni la prima legge di Faraday risulta quindi evidente per sè stessa.

Ci siamo fino ad ora occupati dell'acido cloridrico, che presenta uno dei casi più semplici di elettrolisi. Prendiamo ora il caso del cloruro di zinco $Zn\,Cl_2$, ove abbiamo una molecola consistente di tre atomi invece che di due. Quando questa molecola si dissocia, ciascuno dei due atomi di cloro toglierà un elettrone alla riserva e lascierà lo Zn con due.

Ciascun atomo di zinco richiederà quindi due elettroni per venire neutralizzato e il numero degli atomi di zinco prodotti sarà la metà degli atomi di idrogeno che sarebbero prodotti dalla stessa corrente. La proprietà posseduta da un

atomo di combinarsi con uno, due o tre atomi semplici come quelli dell'idrogeno o del cloro dicesi la « valenza » dell'atomo. Nel caso di un metallo essa è misurata dal numero di elettroni che esso può cedere, o, in altre parole, dal numero di cariche positive elementari che esso può acquistare. Vediamo quindi che *il numero di atomi di qualsiasi sostanza liberati dalla corrente è inversamente proporzionale alla valenza dell'atomo.*

Se gli atomi avessero tutti la stessa valenza, il *peso* della sostanza liberata sarebbe senz'altro proporzionale al peso degli atomi. Siccome però essi hanno valenze differenti, dobbiamo dividere il peso atomico per la rispettiva valenza. I chimici chiamano questa valenza « l'equivalente chimico » della sostanza. Otteniamo così la seconda legge dell'elettrolisi formulata da Faraday: *La quantità di qualsiasi sostanza liberata da una determinata corrente elettrica nell'unità di tempo è proporzionale all'equivalente chimico della sostanza.*

La liberazione di qualsiasi equivalente-grammo (cioè di un numero di grammi corrispondenti agli equivalenti chimici in peso paragonati coll'atomo di idrogeno) richiede il passaggio di 96.537 « armate » o coulombs di elettroni. Questa è la quantità di elettricità necessaria a liberare 1 gr. di idrogeno, 35,5 gr. di cloro, 8 gr. di ossigeno, 31,5 gr. di rame.

Quando i due ioni hanno mobilità eguale, le sostanze liberate ai due elettrodi avranno una eguale

concentrazione. Questo accade, per esempio, nel caso del solfato di potassio, in cui gli ioni K e quelli SO_4 hanno la stessa mobilità. Ma in altri casi, come quello dell' HCl sopra accennato, la migrazione degli ioni H dall'anodo verso il catodo sarà molto più rapida di quella del Cl verso l'anodo. Il risultato sarà che, in sostanza, l'acido si accumulerà verso il catodo lasciando impoverita la soluzione intorno all'anodo.

Nel caso del solfato di rame, per contro, il sale si consuma assai più rapidamente al catodo che all'anodo. Infatti la mobilità del Cu è 0,00048 mentre quella dell' SO_4 è 0,00069. Gli ioni SO_4 si portano all'anodo più rapidamente che non gli ioni Cu nella direzione contraria e la soluzione si diluisce gradatamente al catodo.

Devo ora aggiungere qualche parola riguardo al modo in cui si determina la ionizzazione. Si è trovato che un corpo sciolto in un liquido ha una certa pressione, appunto come l'hanno i gaz. La pressione è infatti eguale a quella che la sostanza avrebbe se il liquido venisse allontanato e le molecole lasciate in sospeso nel luogo dove si trovano. Questa pressione dicesi « pressione osmotica » e può venire dimostrata praticamente mediante due tubi comunicanti separati da una membrana che permette il passaggio dell'acqua ma arresta la sostanza disciolta. Tale membrana dicesi « semipermeabile ». Vi sono delle specie di carta pergamenata che si comportano in questo modo in rapporto allo zucchero. Ora se una soluzione di zucchero viene posta in uno dei tubi

comunicanti e nell'altro si pone acqua pura, il livello della soluzione zuccherina si solleva gradatamente. Esso aspira acqua attraverso la membrana e le molecole di zucchero possono in conseguenza occupare un volume più grande di prima.

Le sostanze disciolte obbediscono alla maggioranza delle leggi sui gas, come a quelle di Boyle, di Gay-Lussac e di Avogadro. Queste leggi affermano che volumi eguali di soluzioni di sostanze diverse alla stessa temperatura ed aventi eguale pressione osmotica contengono lo stesso numero di molecole o di ioni.

Questa legge ci offre il mezzo di determinare il numero degli ioni contenuti in una soluzione. Infatti ogni ione agisce nei fenomeni osmotici come una molecola separata. Basterà quindi determinare l'aumento apparente nel numero delle molecole per poter seguire la dissociazione graduale delle molecole stesse col proseguire della diluizione. I risultati che si ottengono per tal modo trovano importante conferma nella determinazione dell'abbassamento del punto di congelamento delle soluzioni o dell'innalzamento del punto di ebullizione delle stesse coll'aumentare della concentrazione. Le dissociazioni calcolate in seguito a questi esperimenti dànno risultati eguali a quelli ricavati dall'osservazione della pressione osmotica e della conduttività.

6. *Scariche nel vuoto.* — Un corpo elettrizzato può scaricarsi nel vuoto solo quando la scarica possa venire proiettata, nel vuoto circostante,

dal corpo stesso; ciò perchè il vuoto è di per sè un perfetto isolatore. Esso non trasporta elettricità per lo stesso motivo per cui un boccale vuoto non trasporta acqua: perchè non ne contiene. Se il corpo elettrizzato viene portato a contatto con un conduttore, lo sciame degli elettroni liberi del conduttore e del corpo carico attraversano il confine in una direzione o nell'altra fino a che il corpo non sia scaricato o la carica non sia divisa fra i due conduttori in proporzione della loro capacità. Se fra essi si interpone una soluzione di un elettrolito, l'equilibrio si stabilisce con una migrazione di ioni nelle due direzioni attraverso il liquido. Se ne risultasse un gas, lo scambio continuerebbe per opera di quegli elettroni o ioni più pesanti contenuti occasionalmente nel gas, o che potrebbero prodursi in esso in seguito a collisioni o per effetto di qualsiasi altro agente ionizzatore. Ma la cosa è assai diversa quando fra due conduttori che si trovino a diversi potenziali è frapposto il vuoto perfetto. I soli corpi capaci di provvedere i mezzi di trasporto per l'elettricità sono i conduttori stessi. Ora si è trovato che quando anche un conduttore possedesse un potenziale eguale a migliaia di volts, non sarebbe facile ottenere che si scarichi attraverso il vuoto. Gli elettroni isolati o gli atomi positivi non superano mai il numero di uno su un milione, essi però si trovano tutti collocati alla superficie del conduttore a cagione della loro ripulsione reciproca. Perchè essi non abbandonano il conduttore e

non si espandono nel vuoto? La forza che li trattiene non è fino ad oggi spiegata interamente, ma è la stessa forza di quella che impedisce agli ioni di una soluzione di separarsi prima che siano scarichi. Questi ioni si addensano nel liquido che li circonda fino a tanto che perdura la loro carica. Essi attraggono il liquido neutro ed a sua volta il liquido neutro li attrae trattenendoli con forza fino a che essi perdono la loro carica all'elettrodo opposto. Se mai avvenga che gli ioni siano contenuti in un gas umido, essi agiscono come un centro di condensazione; si suppose anzi che tutte le bufere terrestri siano dovute agli ioni dell'atmosfera e specialmente agli ioni negativi come pure agli elettroni. Questa azione condensatrice è, senza dubbio, anche efficace nei metalli ove offre una certa resistenza alla libera espulsione della carica da un conduttore nel vuoto. Quando un liquido carico viene fatto bollire, il vapore non esporta alcuna parte della carica.

La luce ultra-violetta ha un'efficacia sorprendente nel facilitare la scarica degli elettroni da conduttori carichi positivamente, e nell'aiutarli a superare le resistenze che essi incontrano nei casi ordinari. Si può supporre che le onde luminose scuotano energicamente gli atomi neutri addensantisi intorno all'elettrone rendendo quindi libero quest'ultimo.

Supponiamo ora di avere due conduttori collocati nel vuoto ed aventi una differenza di potenziale di un'unità elettrostatica (300 volts) e

che per l'azione della luce ultra-violetta o di altro agente gli elettroni del conduttore negativo siano messi in condizione tale da poter attraversare il vuoto. Essi saranno, com'è noto, respinti dal conduttore negativo ed attratti dal conduttore positivo, e poichè nessun ostacolo è frapposto al loro passaggio, essi percorreranno liberamente lo spazio che separa i due conduttori: possiamo quindi calcolare la loro velocità in base alla legge dei corpi in caduta libera. Ma un modo più semplice è quello di calcolare l'energia degli elettroni e quindi dedurne la velocità. L'energia necessaria per trasportare una « compagnia » (o « unità elettrostatica ») di elettroni contro all'unità di differenza dei potenziali (ossia 300 volts), è eguale a 1 erg. Se una stessa compagnia cade liberamente sotto l'influenza della medesima differenza di potenziale, la sua energia cinetica è eguale a 1 erg. Un elettrone isolato, possedendo una carica di $3{,}4 \times 10^{-10}$ unità, avrà un'energia cinetica di $3{,}4 \times 10^{-10}$ ergon, valore che, come sappiamo, è eguale alla metà della massa moltiplicata per il quadrato della sua velocità:

$$3{,}4 \times 10^{-10} = \frac{1}{2} m v^2.$$

Ora m è $0{,}61 \times 10^{-27}$ di un gramma, da cui possiamo ricavare:

$$v^2 = \frac{2 \times 3{,}4 \times 10^{-10}}{0{,}61 \times 10^{-27}} = 1{,}12 \times 10^{18}$$

e

$$v = 1{,}06 \times 10^9 \text{ cm. al secondo.}$$

Questa è in realtà una velocità stupefacente (6600 miglia al secondo!), valore che è circa un trentesimo della velocità della luce. Ma, per quanto possa sorprendere, questa velocità è stata *effettivamente constatata* nei tubi vuoti. Se i newtoniani, avversari della teoria delle onde luminose, avessero conosciuto questo fatto, la loro teoria dei corpuscoli luminosi sarebbe morta dopo una lotta molto più violenta.

Poichè la velocità varia in ragione diretta della differenza di potenziale, si richiederebbero teoricamente 30^2 o 900 volte 300 volts per impartire agli elettroni una velocità eguale a quella della luce. Questo voltaggio potrebbe forse venire raggiunto, ma non si otterrebbe l'effetto desiderato poichè la resistenza dell'etere alla corsa di un elettrone in corsa molto rapida è assai considerevole, tanto da diventare infinita quando la velocità si approssima a quella della luce.

Gli elettroni proiettati con queste velocità sono quelli che formano i così detti *raggi catodici* scoperti dal Plücker nel 1858 e descritti da Crookes nel 1879 sotto il nome di « materia radiante », nome assai più appropriato di quanto non furono disposti a riconoscerlo gli scienziati a quel tempo, anzi per molti anni susseguenti. Crookes supponeva però che questi raggi fossero formati di atomi che erano allora considerati come i corpi più piccoli che possano esistere in natura. Oggigiorno i raggi catodici potrebbero venire assai propriamente denominati « elettri-

cità radiante ». Questi raggi si producono nei tubi di vetro in cui si sia praticato il vuoto nel rapporto di un milionesimo all'atmosfera, rimanendo per tal modo in esso 40 bilioni di molecole di gas per ogni cm³. Crookes dimostrò che questi raggi procedono in linea retta e in direzione ad angolo retto colla superficie da cui emanano, che un ostacolo frapposto sul loro cammino proietta un'ombra oscura, che essi producono una vivace fosforescenza quando colpiscono vetro o, in modo speciale, gioielli; che essi esercitano una pressione sui corpi che li ricevono, e che possono venire deviati da un magnete. A queste proprietà importanti dobbiamo ora aggiungere quella assai più notevole per cui essi dànno origine ai raggi così detti di Röntgen quando colpiscono un corpo solido.

I corpi carichi positivamente possono parimenti venire scaricati nel vuoto, ma siccome non esistono elettroni positivi, i più piccoli mezzi di trasporto positivi hanno dimensioni eguali a quelle degli atomi, e sono per lo meno 1000 volte più pesanti degli elettroni. Poichè la carica di un atomo positivo è eguale a quella di un elettrone, la forza elettrica che agisce su di esso è pure la stessa. Ma questa forza dovendo impartire movimento ad un corpo che è per lo meno 1000 volte più pesante dell'elettrone, produrrà su questa massa una velocità per lo meno mille volte minore. Wien ha trovato un gruppo di ioni positivi aventi un millesimo della velocità degli elettroni, un altro gruppo che ne aveva

un ventimillesimo, ed infine un ultimo gruppo che aveva velocità eguale ad un milionesimo. Quest'ultimo gruppo deve consistere di atomi neutri combinati ciascuno con un atomo positivo. Gli ioni positivi moventisi con queste velocità relativamente elevate sono detti « raggi canali » perchè si possono vedere assai meglio perforando il catodo e lasciandoli emergere dal lato opposto. È interessante rilevare che le particelle materiali di dimensioni atomiche possono essere dotate di una velocità di sei miglia al secondo col mezzo di un agente artificiale. Questa velocità è pressochè doppia di quella di un punto all'equatore per la rotazione della terra.

Le prodigiose velocità acquistate dalle particelle nel vuoto compiono probabilmente una funzione molto importante nell'equilibrio dell'universo. Bastino poche considerazioni. La differenza di potenziale fra la terra e il sole è di circa un milione di volts, il sole essendo positivo e la terra negativa. Gli elettroni espulsi dalla terra viaggeranno quindi verso il sole con una velocità costantemente crescente e nell'ultima parte del loro percorso avranno raggiunto una velocità eguale a quella della luce. La loro energia cinetica servirà a conservare il calore del sole. Quando essi giungono in vicinanza del sole agiscono come condensatori sui gas neutri che attraversano e vi producono delle goccioline. La pressione massima in paragone col peso è esercitata sulle gocciole di 8×10^{-6} cm. di raggio aventi densità e capacità eguali a quelle

dell'acqua. La pressione radiale è quindi 2,5 volte superiore alla gravitazione universale. Queste goccioline sono costantemente respinte dal sole in numero straordinariamente grande. La loro espulsione conserva al sole la sua carica positiva; ma questa carica non si accresce indefinitamente poichè il sole libera vaste regioni di spazio dagli elettroni che vi abbondano, spingendoli, secondo il calcolo di Arrhenius, al di là di un sesto della distanza che lo separa dalla stella fissa più prossima, mantenendo per tal modo una costante circolazione di elettricità nel sistema solare.

CAPITOLO V.

Elettro-termica.

Torneremo ora a considerare i conduttori metallici onde studiare l'effetto esercitato dal calore sulla distribuzione e il movimento degli elettroni contenuti nei conduttori stessi.

Modernamente si ritiene che il calore sia il risultato del rapido movimento di particelle minutissime della materia. Prima che sorgesse la teoria degli elettroni si supponeva che queste particelle fossero gli atomi. Ora sappiamo che le minime particelle esistenti non sono gli atomi, bensì gli elettroni che sono contenuti per lo meno nello stesso numero degli atomi in un metallo, sono per lo meno mille volte più leggieri di essi e sono circa cento mila volte più piccoli. La uniformità della temperatura nell'intera massa metallica significa che l'energia cinetica media delle particelle di ogni specie è la stessa in ogni volume scelto a caso. Ora, poichè l'energia cinetica di un corpo è $\frac{1}{2} mv^2$, m essendo la

massa e v la velocità, due corpi alla stessa temperatura debbono avere la stessa velocità quando hanno masse eguali; e reciprocamente se le masse sono disuguali le rispettive velocità compenseranno questa disuguaglianza. Se la massa di un corpo è un quarto di quella di un altro corpo, il quadrato della sua velocità sarà quattro volte più grande, cioè esso avrà velocità doppia.

Ora poichè la massa di un elettrone è circa $\frac{1}{56000}$ di quella di un atomo di ferro, la velocità di esso alla stessa temperatura sarà 240 volte più grande.

La temperatura assoluta varia col quadrato della velocità delle particelle. La temperatura « assoluta » in gradi centigradi si computa a partire dallo zero assoluto, cioè 273° sotto al punto di congelamento dell'acqua. Così la temperatura assoluta del ghiaccio in fusione è di 273° e quella dell'acqua bollente è 373°.

Quindi la velocità delle particelle nei punti di congelamento e di ebullizione sarà come:

$$\sqrt{273} : \sqrt{373} \text{ ossia } 16,5 : 19,3.$$

Riscaldando un filo metallico dalla temperatura di congelamento dell'acqua alla temperatura di ebullizione, la velocità di tutti i suoi atomi ed elettroni viene aumentata del 17 per cento.

Abbiamo veduto che gli elettroni si comportano in pratica come un gaz capace di penetrare in un metallo, e quando essi sono riscaldati si verifica lo stesso effetto che si verificherebbe

nell'aumento di pressione di un gaz quando esso venisse riscaldato. La pressione degli elettroni aumenta infatti ed essi si inoltrano nelle parti più fredde dove la pressione è minore.

Si produce così uno spostamento di elettroni e noi sappiamo che uno spostamento di elettroni costituisce una corrente elettrica. È quindi possibile generare una corrente elettrica riscaldando un metallo in modo diverso nelle sue varie parti.

Se il filo metallico è avvolto in forma di anello ed è riscaldato in un punto, le correnti degli elettroni dirette in direzioni opposte partiranno dal punto riscaldato. Naturalmente non esisterà corrente che compia il circuito poichè le due correnti opposte si neutralizzeranno a vicenda. Ma se il filo da una parte del punto riscaldato viene raffreddato mediante un refrigerante, l'abbassamento di pressione sarà più rapido in quella porzione e gli elettroni si dirigeranno di preferenza in quella direzione. Vi sarà quindi una corrente di elettroni nella direzione del refrigerante ed una corrente positiva nella direzione opposta. Qualsiasi altro mezzo diretto a rendere più rapido l'abbassamento di temperatura e di pressione cinetica produrrà un effetto simile. Così se il filo viene passato lentamente sopra una fiamma risultandone un salto più brusco di temperatura dinanzi alla fiamma che non dietro, si formerà una corrente di elettroni nella direzione in cui la fiamma si sposta rispetto al filo.

Inversamente, se una corrente di elettroni viene lanciata in un filo contenente un punto riscaldato essa trascinerà con sè il calore producendo un abbassamento più graduale dal lato opposto del punto riscaldato. Questo fatto può essere osservato assai bene con un filo di ferro.

Il modo più semplice di alterare l'andamento

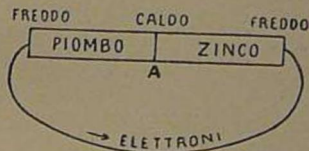



Fig. 18.

della curva calorifica è quello di riunire due metalli di diversa conduttività rispetto al calore. Così (fig. 18) se si unisce una sbarra di piombo ad una sbarra di zinco e si riscalda il punto di congiunzione A, l'abbassamento di temperatura sarà più rapido dalla parte del piombo che dal lato dello zinco, ed una corrente d'elettroni passerà costantemente dallo zinco al piombo e continuerà nel filo che ne congiunge le estremità. Ovvero, per usare l'antica dizione, una corrente (positiva) attraverserà il punto di congiunzione dirigendosi dal piombo allo zinco.

Se manteniamo freddo il punto di congiunzione dello zinco col piombo e lanciamo una corrente diretta dallo zinco al piombo è evidente che lo stesso numero di elettroni deve

passare attraverso a ogni sezione trasversale, tanto del piombo quanto dello zinco. Poichè la resistenza da superarsi è più grande nel piombo che nello zinco, gli elettroni che entrano nel piombo devono acquistare una quantità sussidiaria di energia che non può essere ricavata che dal movimento degli atomi e degli elettroni stessi. Cioè il punto di congiunzione A verrà raffreddato. Se la corrente di elettroni venisse lanciata nel senso opposto, questo punto di congiunzione si riscalderebbe. Questi riscaldamenti e raffreddamenti dei punti di congiunzione di metalli diversi attraversati da corrente sono compresi nella denominazione di « fenomeno del Peltier ».

Nei ragionamenti sopra esposti abbiamo supposto che i riscaldamenti e i raffreddamenti successivi non abbiano effetto sulla conduttività del metallo nè sui suoi due fattori, cioè la densità e la mobilità degli elettroni. Ma in realtà questi due fattori sono profondamente influenzati dal calore ed i fenomeni esposti sono quindi assai più complicati di quanto non risulti dalla nostra esposizione. Prima di arrivare a comprendere bene i fenomeni di elettro-termica dobbiamo procurarci delle ulteriori informazioni relative a questi due fattori, e dobbiamo ancora considerare la differenza di potenziale fra due metalli o altri conduttori prodotta dal loro contatto alla temperatura ordinaria.

Io ho esposto i principî generali su cui deve essere basata una completa teoria dell'elettro-

termica la quale non è, fino ad ora, stata formulata. Le vecchie teorie rimasero impotenti dinanzi alla sorprendente varietà dei fenomeni termo-elettrici. La teoria degli elettroni ci dà invece un valido aiuto per spiegarli; molto rimane però da fare e non vi può essere campo più proficuo per uno studente volonteroso, nè campo più promettente di risultati, di quello della correlazione fra i fenomeni termici e i fenomeni elettrici.

La conversione di energia termica in energia elettrica — in altre parole la generazione diretta dell'elettricità dal carbone — è un problema collegato ai più vitali interessi economici (1). Si sono impiegate durante un certo tempo le batterie termo-elettriche nella galvanoplastica ed in altre piccole installazioni, ma esse lasciano tuttavia molto a desiderare per quanto riguarda la loro efficacia e la loro durata. Le esperienze fatte alla cieca non possono certamente condurre a perfezionamenti radicali senza prima far attraversare una vasta serie di costose delusioni. Ma una teoria dell'elettro-termica solidamente costituita potrà indicare la via che guida al successo con un grado di probabilità superiore assai.

---

(1) Non mancarono i tentativi diretti a ottenere una forza motrice termo elettrica suscettibile di applicazione industriale. Per es., la pila di Noë e quella di Clamond (V. Roiti, Op. cit., vol. II, p. 472).

(N. d. Tr.).

Seebeck osservò che quando un'asta di antimonio viene unita ad un'altra di bismuto e si riscalda il loro punto di congiunzione, incurvando l'asta di bismuto in modo da farle raggiungere l'estremità libera dell'antimonio, mantenendosi freddo questo secondo punto di congiunzione, una corrente (positiva) attraversa il punto di congiunzione caldo diretta dal bismuto verso l'antimonio.

Ciò significa, secondo la teoria degli elettroni, che questi percorrono la regione calda andando dall'antimonio al bismuto e la regione fredda passando dal bismuto all'antimonio. Non vi è una vera « corrente positiva » poichè a questa occorrerebbero atomi per il trasporto e gli atomi potrebbero essere forniti solo dal bismuto ed attraversare la regione calda di congiunzione, diretti verso l'antimonio. L'estremo della porzione metallica costituita da antimonio sarebbe così convertita in una lega di bismuto e antimonio. Questo fatto non si è mai constatato, ma si è trovato che un metallo assoggettato ad una pressione di estrema grandezza può essere costretto a diffondersi in un altro metallo e che quando ciò avviene si può pure far passare una vera corrente positiva od atomica. Nelle circostanze ordinarie la corrente degli elettroni è la sola corrente elettrica abbastanza pronunciata per essere suscettibile di misurazione. Possiamo però supporre che in certa misura la diffusione atomica si verifichi anche alla pressione ordinaria ed è a questa corrente atomica di diffusione che si può attribuire l'e-

saurimento graduale delle batterie termo-elettriche.

L'antimonio ed il bismuto producono uno dei più pronunciati fenomeni di elettro-termica e a ciò è dovuta senza dubbio la scoperta fatta da Seebeck. Ma qualsiasi combinazione di metalli può venire impiegata per generare correnti termo-elettriche, e la intensità di queste correnti così generate varia a seconda dei metalli. Sappiamo che la corrente è proporzionale alla conduttività ed all'energia impiegate nel trascinare un elettrone lungo il circuito, ed abbiamo visto che questa energia per ogni elettrone dicesi la « forza » elettromotrice (F. E. M.). Ora la F. E. M. generata da una coppia di bismuto e antimonio, i cui punti di congiunzione sono mantenuti rispettivamente al punto di ebullizione ed al punto di congelamento dell'acqua, è $\frac{1}{200}$ di quella di una pila Daniell, cosicchè si dovrebbero disporre in serie 200 coppie metalliche per ottenere la F. E. M. di una pila Daniell. Ma il bismuto essendo assai costoso e la sua resistenza specifica assai grande, una tale batteria costerebbe molto più di una semplice pila. Però si potrebbe da essa ottenere una corrente in qualsiasi momento riscaldandone alternativamente i punti di congiunzione con acqua bollente o con vapore.

E. Becquerel nel 1854 confrontò molti metalli col rame e misurò la F. E. M. che essi possono sviluppare se si accoppiano col rame mantenendo rispettivamente i punti di congiunzione

alle temperature dell'acqua congelantesi e bollente. Riporto qui i risultati ottenuti:

Bismuto . . .	— 3,91	Platino .	— 0,09 a 0,38
Cobalto. . . .	— 2,24	Zinco . .	— 0,02 a 0,04
Nichelio . . .	— 1,63	Rame . .	0
Argentone . .	— 1,26	Argento .	+ 39,95
Palladio . . .	— 0,82	Cadmio .	+ 0,033
Mercurio . . .	— 0,48	Ferro . .	+ 0,95 a 0,67
Piombo . . .	— 0,187	Antimonio	+ 1,41
Stagno . . .	— 0,147	Tellurio .	+ 0,026

Le cifre qui sopra indicate significano millesimi di un Daniell (1 Daniell = 1,1 volts) ed il segno negativo indica che la corrente positiva attraversa il punto caldo di congiunzione passando dal metallo in esame al rame, cioè che il rame lancia elettroni nel metallo attraverso al punto di congiunzione riscaldato.

La F. E. M. di due metalli qualsiasi può calcolarsi sommando le cifre date per ciascuno se sono di segno opposto o sottraendole se hanno segno eguale.

Si vedrà subito che i metalli più comuni producono effetti termo-elettrici poco considerevoli. Una coppia termo-elettrica di zinco e rame svolge $\frac{1}{200}$ della F. E. M. posseduta da una coppia di bismuto e antimonio cosicchè sarebbero necessarie 40.000 coppie di zinco e rame per produrre una F. E. M. eguale a quella di una pila Daniell.

L'energia termo-elettrica è, in generale, proporzionale alla differenza di temperatura dei due

punti di congiunzione. L'aumentare dell'energia termo-elettrica coll'aumentare della differenza di temperatura è così costante e regolare che si potè basare su di essa un sistema di termometria consistente nell'aggruppamento di coppie termo-elettriche (1). Ma alcune coppie e specialmente le combinazioni col ferro mostrano un ritardo graduale nell'aumento di intensità ad alte temperature ed a una differenza di temperatura determinata corrisponde un'energia termo-elettrica eguale a zero, oppure la produzione di una nuova energia nella direzione contraria.

Libenow trovò una relazione importante fra le conduttività termiche ed elettriche, relazione che ci rende possibile di prevedere la forza termo-elettrica di una combinazione di due metalli con qualche certezza. Egli trovò che quanto più è grande la conduttività termica rispetto a quella elettrica, tanto più liberamente gli elettroni escono da un metallo attraversando il punto di congiunzione riscaldato. Egli trovò ancora che esiste una F. E. M. generata entro al metallo stesso, la quale dà impulso agli elettroni per avviarli nella direzione in cui il calore si propaga. Ciò è appunto quanto dovevamo presupporre. La F. E. M. di una coppia termo-elettrica è un effetto differenziale dovuto all'eccedenza di elettroni messi in movimento dal calore in uno dei due metalli rispetto

(1) Sono note a questo proposito le esperienze e le misure del Melloni fatte con pile termo-elettriche in unione a galvanometri adatti. (N. d. Tr.).

all'altro. Se L è la conduttività termica e S la conduttività elettrica, la F. E. M. fra due porzioni di uno stesso metallo mantenuto a due temperature diverse, cioè al punto di ebullizione ed a quello di congelamento dell'acqua, è proporzionale a $\sqrt{\frac{L}{S}}$. Ciò significa che qualsiasi influenza che modifichi le due conduttività, modifica pure la F. E. M. del metallo in questione. Ora noi sappiamo che la resistenza di un metallo aumenta colla temperatura, cioè che la conduttività diminuisce quando la temperatura aumenta. Quindi il rapporto sopra stabilito crescerà col calore, se la conduttività termica rimane costante. Questo è il caso più generale e qualunque sia la differenza delle forze termo-elettriche interne possedute da due metalli questa differenza, di regola, aumenta coll'aumentare del riscaldamento. Ma in taluni metalli la differenza tende a eliminarsi col riscaldamento od anche ad invertirsi ed allora la F. E. M. della coppia raggiunge un massimo e in seguito diminuisce.

Per facilitare la ricerca della coppia termo-elettrica ideale — un ideale che, raggiunto, sarebbe di incalcolabile importanza pratica — possiamo dire che sono necessari due metalli in cui i rapporti $\sqrt{\frac{L}{S}}$ siano quanto più differenti possibile. Per es., uno dei metalli dovrà avere una conduttività termica molto alta, mentre l'altro l'avrà molto bassa, in paragone della rispettiva conduttività elettrica. Nell'antimonio

questo rapporto è molto grande mentre nel bismuto è molto piccolo.

Altro *desideratum* si è che i rapporti dei due metalli non tendano a diventare eguali col crescere della temperatura. Infatti in tal caso si giungerebbe ad un punto (detto il « punto neutro ») in cui lo spostamento degli elettroni si verificherebbe in misura eguale nelle due direzioni partendo dal punto di congiunzione riscaldato e nessun elettrone attraverserebbe questo punto. Non vi sarebbe corrente di elettroni e quindi nemmeno « corrente positiva ».

Il rapporto dipende essenzialmente dall'energia dei trasportatori del calore o dell'elettricità paragonati alla loro temperatura assoluta. Il portatore dell'energia termica è l'elettrone, che ha una massa eguale a 10^{-27} gr., massa che indicheremo con m. I portatori dell'energia termica sono tanto gli atomi quanto gli elettroni. Se essi sono rappresentati in modo speciale dagli atomi, noi possiamo ritenere la loro massa, che indicheremo con M, come circa 60.000 volte più grande di quella degli elettroni. Finalmente indicando con T la temperatura assoluta (cioè 273 più un numero di gradi centigradi) avremo che la forza interna termo-elettrica di un metallo è proporzionale a $\frac{\sqrt{m\,M}}{T}$. Il migliore effetto termo-elettrico si otterrebbe quindi combinando due metalli diversi in modo tale che questo rapporto sia grande per uno di essi e piccolo per l'altro. Questo rapporto è, come abbiamo visto, piccolo

nel bismuto; ivi la massa dei portatori del calore è molto piccola. Ciò significa ovvero che vi sono pochi gruppi atomici, ovvero che gli elettroni diffondono essi stessi la maggior parte dell'energia termica. Nell'antimonio, per contro, i portatori del calore formano generalmente masse assai più grandi. Vi è più energia in un grammo di antimonio che non in un grammo di bismuto alla stessa temperatura, cosicchè gli

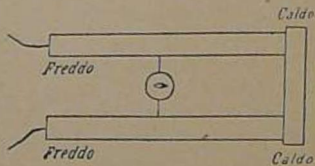



Fig. 19.

elettroni che tendono a consumare la loro energia quanto più rapidamente possibile, passano di preferenza nel bismuto. Nel punto freddo di congiunzione, dove la differenza di energia non è così pronunciata, gli elettroni devono forzatamente ritornare nell'antimonio per la pressione del punto caldo di congiunzione e così il circuito è completato.

Se d'altra parte si lancia una corrente indipendente attraverso la congiunzione dal bismuto all'antimonio, l'energia crescente nell'antimonio viene prodotta dall'assorbimento di calore nel punto di congiunzione. Questo è il fenomeno di

Peltier. Il raffreddamento del punto di congiunzione genera a sua volta una corrente in direzione opposta a quella della corrente originaria. Questo è un esempio della nota regola per cui un'azione qualsiasi esercitata da una corrente elettrica opera in modo contrario alla corrente. In breve: ogni azione di una corrente elettrica è un auto-annientamento.

Riassumendo abbiamo tre effetti termo-elettrici. Il primo, quello scoperto dal Seebeck, dimostra la generazione di una corrente elettrica dal riscaldamento diseguale dei due punti di congiunzione di due metalli differenti. Il secondo, quello scoperto dal Peltier, dimostra il raffreddamento di una congiunzione di due metalli differenti che quando venissero riscaldati produrrebbero una corrente nella stessa direzione. Se si inverte la corrente, la congiunzione dei metalli si riscalda invece di raffreddarsi. Il terzo effetto è denominato « effetto di Thomson o di Kelvin » ed è il più importante, gli altri due essendo semplicemente differenziali. Esso consiste nel trasporto di elettricità col mezzo di una corrente termica e *viceversa*. Un esperimento ingegnoso per dimostrare questo effetto venne ideato dal Le Roux. Viene lanciata una corrente attraverso a tre sbarre di rame, disposte come mostra la figura. I punti di congiunzione dal lato destro sono riscaldati mentre che le altre estremità sono mantenute fredde. Non vi può essere effetto di Seebeck, il metallo essendo uniforme, ma in una delle sbarre la corrente va

dalla parte fredda alla calda e nell'altra dalla parte calda alla fredda, e cioè da una parte è contraria alla corrente termica e dall'altra parte invece la seconda. Ne consegue che il calore si trasporta più rapidamente in una sbarra che nell'altra turbando il corso regolare della corrente elettrica. Un galvanometro, intercalato come indica la figura, e combinato in modo da non mostrare alcuna deviazione quando i punti di congiunzione si trovano alla stessa temperatura, si sposta invece in modo permanente quando si verifica un aumento di calore, indicando il passaggio di una corrente.

CAPITOLO VI.

Elettricità voltaica.

Sotto il nome di elettricità voltaica si comprendono vari fenomeni dipendenti dal diverso comportamento dei corpi in rapporto all'elettricità prescindendo dalle influenze della temperatura, del magnetismo o di altri fattori.

Questi fenomeni si collegano alla più intima struttura degli elementi e presentano grande varietà ed una certa indeterminatezza essendo profondamente modificati dall'influenza delle condizioni dell'ambiente e dalla presenza di sottili impurità. Ma nei lunghi anni che seguirono la scoperta dell'elettricità di contatto fatta dal Volta, molto si fece nell'intento di stabilire i principî generali che presiedono allo svolgersi di questi fenomeni e che rivelano la correlazione di essi colle reazioni chimiche.

Elettrizzazione per contatto. — La scoperta fondamentale fatta dal Volta nel 1797 si è che portando a contatto una lastra di zinco con una

lastra di rame si produce spontaneamente una carica nei due metalli, lo zinco risultando carico positivamente ed il rame negativamente.

Poichè la riunione dei due metalli non sviluppa forza elettrica agente a distanza, l'elettrizzazione positiva dello zinco deve essere perfettamente eguale all'elettrizzazione negativa del rame. Cioè, per esprimerci colla nomenclatura della teoria degli elettroni, un numero di elettroni ha attraversato il punto di contatto dello zinco e del rame. Se si separano i due metalli, le loro cariche risultano più evidenti poichè cessano di neutralizzarsi reciprocamente; queste cariche possono venire annullate congiungendo i metalli colla terra. In altre parole, se si collegano i due metalli alla terra, per es., con un tubo di conduttura dell'acqua, gli elettroni passano dalla terra allo zinco e dal rame alla terra fino a che il rame, lo zinco e la terra si riducono allo stesso potenziale. Questo procedimento può essere ripetuto indefinitamente, sempre con lo stesso risultato.

Possiamo esprimere questo fatto dicendo che il rame esercita sugli elettroni un'attrazione più grande che lo zinco. Quindi allorchè gli elettroni passano dallo zinco nel rame si esercita un lavoro su di essi appunto come avviene quando gli elettroni passano da un corpo caricato negativamente ad uno caricato positivamente, cioè da un corpo avente un eccesso di elettroni ad un corpo che ne abbia deficienza. Vi è fra essi un potenziale naturale e reciproco che ha effetto

solo quando i due corpi vengono portati a contatto e provoca il passaggio degli elettroni dallo zinco al rame. Questo passaggio continua fino a che la carica positiva dello zinco e la carica negativa del rame diventano così grandi che i potenziali dovuti ad esse controbilanciano la differenza del potenziale. Il nuovo potenziale dovuto a queste cariche è quindi una misura della differenza naturale di potenziale ed è chiamato il « potenziale di contatto » fra i due metalli. Si trovò che questo potenziale di contatto è costante adoperando le stesse qualità di metalli, verificandosi soltanto delle leggere perturbazioni dovute alle variazioni di temperatura e delle condizioni superficiali. Esso misura circa tre quarti di un volt nel caso del rame e dello zinco commerciali. Ciò significa che quando una « compagnia » di elettroni (cioè un'unità elettrostatica di elettricità negativa) passa dallo zinco, originariamente scarico, al rame parimenti scarico, attraverso alla loro congiunzione, il lavoro esercitato su di essa e convertito in calore è $\frac{1}{400}$ di una dina.

Quanto più grande è la superficie dei metalli, quanto più piccola la distanza che li separa, tanto più grande è la loro « capacità » (p. 63) considerandoli come formanti un condensatore. Ne consegue che è anche tanto più grande la quantità di elettricità che deve passare a fine di annullare la differenza naturale di potenziale. Cioè, quantunque il potenziale di contatto sia

una quantità costante, la carica effettiva dei metalli dipende dalle loro dimensioni e dall'intimità del loro contatto. Questo fatto spiega in misura considerevole l'elettrizzazione per frizione in cui lo sfregamento di un corpo su di un altro accresce la carica di entrambi.

Dobbiamo ora cercare di dare spiegazione della maggiore tendenza che ha lo zinco, paragonato al rame, a disfarsi dei suoi elettroni.

Abbiamo veduto sopra (pag. 120) come gli atomi dei metalli abbiano tendenza a liberarsi ciascuno di uno o di due elettroni sempre quando essi si trovino in presenza di un atomo non metallico disposto ad assumere questi elettroni ed a trattenerli.

Se si immerge dello zinco in una soluzione diluita di un suo sale — per es. cloruro di zinco — gli atomi del metallo hanno una grande tendenza a passare nel liquido come ioni positivi. Nei tentativi per riuscire ad effettuare questo passaggio questi atomi devono occupare in qualche modo gli elettroni superflui. Gli atomi dello zinco contenuti nella soluzione non possono assorbire elettroni senza neutralizzarsi e precipitare, mentre invece gli atomi del cloro hanno in precedenza ricevuto la carica degli elettroni resi liberi dallo zinco disciolto. Non rimane quindi altra alternativa all'infuori di quella che gli elettroni rimangano nella massa metallica, la quale risulta quindi caricata negativamente. Se anche questa carica negativa viene distrutta col provocare un contatto colla terra, la soluzione dello

zinco non può più continuare a lungo poichè l'accumulo degli ioni positivi dello zinco nel liquido carica il liquido stesso positivamente ed impedisce quindi l'ulteriore assunzione di atomi positivi. La carica positiva del liquido può essere misurata e la misura che si ottiene esprime la forza con cui lo zinco tende a liberarsi dai suoi elettroni ed a disciogliersi. Questa tendenza è chiamata la « pressione di soluzione » dello zinco. Essa è molto simile alla « pressione di vaporizzazione » di un liquido, e, appunto come questa ultima, viene misurata in atmosfere. La pressione di soluzione dello zinco è enorme: circa un trilione di atmosfere. Quella del rame nel solfato di rame è molto piccola, misurando circa un trilionesimo di atmosfera. Non dovrà quindi più recare sorpresa il fatto che, quando rame e zinco vengono posti a contatto, la tendenza dello zinco a disfarsi dei suoi elettroni si esplica nel passaggio degli elettroni dallo zinco al rame, producendo così il fenomeno osservato dal Volta.

La facilità con cui lo zinco perde i suoi elettroni è dimostrata con molta evidenza da alcuni esperimenti effettuati recentemente dal Fuechtbauer, che dopo aver prodotto dei « raggi canali » o ioni gassosi positivi in un tubo vuoto, diresse questa corrente luminosa sopra varie specie di metalli. Il Fuechtbauer osservò che i metalli: platino, argento, rame, zinco e alluminio sviluppano degli elettroni sotto l'influenza dei raggi canali; e che la corrente degli elettroni svolti dal rame stava a quelli svolti dallo zinco

nel rapporto di 128 a 192. Una corrente assai più grande (305) fu ottenuta dall'alluminio, ma il comportamento di questo metallo dipende assai dalle sue condizioni superficiali. Quando esso è levigato con olio e pietra pomice è più positivo dello zinco e quindi lascia liberi gli elettroni assai più facilmente; quando invece viene lavato con acqua e poi fatto asciugare all'aria, esso è meno positivo dello zinco.

Altra serie di fenomeni che possono aiutare nella spiegazione dell'elettricità per contatto è quella delle scariche mediante la luce ultra-violetta. Questo fenomeno notevole scoperto da Hertz e studiato nei suoi particolari da Elster e Geitel, da Stark e da altri, consiste nella scarica spontanea di un corpo carico negativamente e illuminato da luce ultra-violetta.

L'esperienza può venire eseguita nel modo seguente: Si dispone verticalmente una lastra di zinco ben pulita, a breve distanza dalla luce prodotta da una lampada ad arco o da una intensa scintilla elettrica le quali contengono entrambe molti raggi ultra-violetti. La lastra di zinco viene collegata ad un elettrometro molto sensibile il quale dopo breve tempo rileverà una carica positiva che crescerà gradatamente tanto da raggiungere anche 30 volts se vi si fa soffiare dell'aria contro affine di asportare a distanza gli elettroni. Ciò dimostra che la lastra di zinco ha ceduto dell'elettricità negativa, cioè degli elettroni. Questa conclusione è confermata se si fa aspirare da un tubo metallico contenente un

tappo di lana di vetro all'altra estremità, del gaz nelle vicinanze della lastra, poichè questo tubo risulta carico negativamente a cagione dell'assorbimento degli elettroni per mezzo delle sue pareti.

Se all'inizio la lastra di zinco è carica negativamente, essa perde gradatamente la sua carica quando si trova immersa nell'oscurità. Ma se si dispone al disopra di essa una rete di rame o di bronzo e si illumina quindi la lastra attraverso a questa rete, con raggi ultra-violetti, la carica si dissipa assai rapidamente. Ciò non si verifica per le cariche positive. Se la rete di rame è collegata collo zinco attraverso un galvanometro ed una batteria in modo tale che lo zinco risulti carico negativamente, il galvanometro rivela una corrente costante di elettroni diretta dallo zinco al rame attraverso alla batteria, fino a tanto che dura l'illuminazione.

Una corrente simile dicesi « corrente foto-elettrica » e non solo può essere ottenuta dallo zinco, ma anche da altri metalli; nel rame e nel platino queste correnti sono però molto deboli a cagione della tenacia con cui questi metalli trattengono i loro elettroni.

Volta dispose parecchi metalli in serie in modo tale che ciascun metallo combinato col metallo successivo risulti carico positivamente. La serie di Volta è la seguente: zinco, piombo, stagno, ferro, rame, argento, oro. Egli trovò inoltre che la forza di contatto fra due qualsiasi di questi metalli era eguale alla somma delle forze di con-

tatto delle coppie interposte fra essi, il che è ovvio, poichè l'abbassamento di potenziale tra il primo metallo e il secondo e tra il secondo e il terzo deve essere eguale all'innalzamento di potenziale nel passaggio del terzo metallo procedendo indietro fino al primo, per il principio della conservazione dell'energia. Altrimenti un elettrone nello spostarsi in tal modo dovrebbe generare continuamente dell'energia dal nulla.

Una serie voltaica più completa è quella data dall'Hankel, composta di alluminio, zinco, cadmio, piombo, stagno, antimonio, bismuto, argentone, bronzo, mercurio, ferro, oro, rame, palladio, argento, coke, platino.

Che la serie voltaica sia determinata dalla facilità con cui i metalli cedono i loro elettroni è provato dal fatto che questa stessa serie corrisponde:

a) alla pressione di soluzione di un metallo immerso nella soluzione di un suo sale;

b) alla corrente foto-elettrica generata dal metallo;

c) alla corrente degli elettroni generata da un metallo esposto all'influenza dei raggi canali.

Possiamo quindi ritenere che la forza di contatto fra due metalli (intorno all'origine della quale i fisici furono discordi per secoli) è ora spiegata da un principio semplicissimo e che la spiegazione che ci rimane a desiderare si è la ragione della forza più o meno grande con cui i metalli trattengono i loro elettroni. Una spiegazione molto ingegnosa è quella che propose

J. J. Thomson basata sull'equilibrio di configurazioni diverse di elettroni contenuti in una sfera di elettricità positiva (V. Thomson, « *Elettricità e materia* »). Per intanto riterremo come ammessa questa varietà di forza attrattiva esercitata dai metalli sugli elettroni.

L'elettrizzazione di contatto non è limitata ai metalli ma è praticamente universale non soltanto fra corpi diversi, bensì ancora fra corpi eguali presentanti soltanto lievi differenze nella struttura o nella condizione superficiale. Abbiamo già veduto come si sviluppi una specie di forza elettro-motrice fra due frazioni di uno stesso corpo che si trovino a diversi gradi di temperatura, la sola differenza essendo quella prodotta da questa artificiale diversità di temperatura.

Anche i corpi non conduttori sviluppano forze di una certa entità quando sono portati a contatto; queste forze possono essere misurate collocandoli fra metalli differenti. Ad esempio collocando uno strato di paraffina fra due lastre di rame e zinco, queste lastre acquistano una certa differenza di potenziale che rappresenta la somma delle forze sviluppate dai contatti fra il rame e la paraffina e fra la paraffina e lo zinco rispettivamente.

Elettricità di frizione. — Il fatto che l'elettrizzazione risultante dallo sfregamento è dello stesso segno di quella risultante dal contatto dimostra che la prima è semplicemente una specie della seconda. Ma l'elettrizzazione ottenuta per sfregamento è ancora più sensibile alle

variabili condizioni superficiali, senza dubbio perchè in essa il contatto è più intimo, venendo così ad aumentare la capacità dei due corpi e la carica che essi acquistano a parità della differenza del potenziale. Queste cariche possono essere molto alte, e sono limitate ad un'area più piccola nei corpi non-conduttori che non nei corpi conduttori, perchè in questi ultimi le cariche si distribuiscono uniformemente alla superficie. Può quindi accadere che quando due conduttori vengono separati dopo essere stati strofinati l'uno contro l'altro, le loro cariche siano tanto forti da produrre scintille e scosse. Questa circostanza spiega come l'elettrizzazione per sfregamento fu la prima forma di elettrizzazione ad essere scoperta.

Si tentò di raggruppare i corpi in una serie simile alla serie voltaica in modo tale che uno qualsiasi di essi, sfregato contro il corpo immediatamente successivo, si elettrizzi positivamente. La serie stabilita da Faraday è la seguente: pelle di gatto, flanella, avorio, cannelli di piume, cristallo di rocca, vetro di rocca, cotone, canapaccio, seta greggia, la mano, lana, lacca, metalli (ferro, rame, bronzo, stagno, argento, platino), zolfo.

Da questa serie si rileva che tutti i metalli cedono meno facilmente i loro elettroni che non quasi tutte le sostanze sopra enumerate. Ma il caoutchouc, la ceralacca, lo zolfo, il collodio e il cotone fulminante sono ancora più avari dei loro elettroni e quindi si caricano negativamente

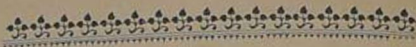
anche quando vengono strofinati colla seta. Gaugain ha raggruppato i metalli in una serie, per rapporto all'elettrizzazione per sfregamento, la quale corrisponde assai da vicino alla serie voltaica.

La pila di Galvani. — In tutte queste elettrizzazioni per contatto non si verifica alcun passaggio di un materiale nell'altro, poichè sono solamente gli elettroni che si trasportano da un corpo all'altro e la sostanza che cede più facilmente i suoi elettroni risulta carica positivamente. Ma uno stato di cose assai diverso si produce quando un metallo viene immerso in un liquido capace di discioglierlo. In questo caso è il metallo disciolto e non la massa solida che cede gli elettroni per formarne degli ioni idratati, e di regola, gli elettroni vengono assorbiti dalla massa solida del metallo che risulta quindi caricato negativamente. Quanto più grande è la pressione di soluzione del metallo, tanto più grande è la sua tendenza a cedere elettroni, e tanto più grande sarà per conseguenza il numero degli elettroni accumulati dalla massa metallica. Questo risultato appare strano se non si riflette al fatto che gli ioni dello zinco sono il risultato di un accumularsi del solvente intorno agli atomi dello zinco — accumulo che significa energia. Poichè questo accumularsi del solvente avviene soltanto quando l'atomo è carico, e siccome l'atomo dello zinco non può assorbire un elettrone in eccedenza, esso deve perdere uno o due elettroni per acquistare una carica. Si deve effettuare un certo lavoro per strappare gli atomi

di zinco positivi fuori dal metallo carico negativamente e l'energia necessaria per questo lavoro è fornita dall'aggruppamento delle molecole del solvente. Se, oltre allo zinco, si immerge un altro metallo, per es. rame, nello stesso solvente, può accadere che la pressione di soluzione dei due metalli differisca notevolmente. In tal caso lo zinco si caricherà più energicamente che non il rame, e se si stabilisce un collegamento metallico fra essi, si produrrà una corrente elettrica diretta dallo zinco al rame. Secondo l'antica nomenclatura si direbbe che una « corrente positiva » passa dal rame allo zinco. Il passaggio della corrente continuerà fino a tanto che l'eccesso di elettroni sia allontanato dallo zinco, ma fino a che gli atomi di zinco continueranno a disciogliersi ed a fornire elettroni allo zinco, non si verificherà interruzione nella corrente.

Supponiamo di avere costituito una pila galvanica elementare, consistente cioè di una lastra di rame e di una lastra di zinco immerse in acido solforico diluito e collegato da un filo metallico fuori del liquido. Questo liquido contiene molecole di acqua, molecole di acido: H_2SO_4; ioni positivi H; e ioni negativi SO_4. Gli atomi di zinco si sciolgono continuamente e cedono i loro elettroni allo zinco da cui provengono. Questi elettroni, trasportandosi per il circuito esterno fino a raggiungere il rame, neutralizzano gli atomi H posti nelle vicinanze del rame e liberano l'idrogeno dal liquido da cui esce in forma di bolle. Così lo zinco scompare nel li-

quido da una parte e l'idrogeno abbandona il liquido dall'altra parte. Tanto l'idrogeno quanto lo zinco sono costituiti da atomi carichi positivamente, ed abbiamo quindi una vera « corrente positiva » che, in realtà, esiste soltanto negli strati immediatamente vicini all'elettrodo. La corrente effettiva continua che percorre il circuito esterno è la corrente degli elettroni. Essa è la sola cosa che si sposta nel filo metallico.

Tutte le batterie elettriche operano in base al principio sovra esposto. Esse differiscono soltanto fra loro per i mezzi adottati onde aumentare la differenza della pressione di soluzione, facilitare lo scambio degli elettroni, ridurre la resistenza del liquido, assicurare la costanza e continuità della corrente, e accrescere l'efficacia e l'economia del lavoro effettivo prodotto nelle varie applicazioni.

CAPITOLO VII.

Elettro - dinamica.

Fino ad ora abbiamo trattato delle forze che agiscono fra gli elettroni nella loro posizione di riposo. Abbiamo visto che un elettrone ne respinge un altro collocato ad una distanza di un centimetro con una forza di $1,16 \times 10^{-19}$ dine e ciò qualunque sia la sostanza fra essi interposta. La stessa forza si sviluppa fra due atomi neutri quando ciascuno di essi è privato di un elettrone, risultando quindi convertito in un « atomo positivo ». D'altra parte un elettrone *attrae* un atomo positivo con la stessa forza.

Queste tre forze sono dette forze elettrostatiche perchè i corpi elettrici sono in riposo. Consideriamo ora le forze che agiscono quando i corpi elettrici sono in movimento.

Quando due elettroni viaggiano nell'etere lato a lato, una parte della loro reciproca forza di ripulsione scompare. La quantità della forza di ripulsione che si annulla dipende dalla velocità

che anima gli elettroni; essa aumenta in modo direttamente proporzionale alla velocità e quando gli elettroni si muovono con una velocità eguale a quella della luce, la loro forza di ripulsione scompare interamente e i due elettroni non esercitano più alcuna azione fra loro. Lo stesso mutamento di forze si verifica quando due atomi positivi viaggiano lato a lato nell'etere.

Entrambi questi fatti possono venire spiegati più chiaramente col dire che due elettroni (o due atomi positivi — o cariche simili di qualsiasi specie) viaggianti a lato nell'etere sviluppano una forza reciproca di attrazione che aumenta con la velocità e che controbilancia la reciproca ripulsione elettrostatica non appena essi raggiungono la velocità della luce.

Quando un elettrone ed un atomo positivo viaggiano lato a lato nell'etere, la loro attrazione reciproca originaria è controbilanciata da una reciproca ripulsione, cosicchè, anche in questo caso, quando essi raggiungono la velocità della luce, non vi è sviluppo di forza alcuna. Ne consegue che quando un atomo neutro viaggia così rapidamente da avvicinarsi alla velocità della luce, esso diventa incapace di trattenere i suoi elettroni e diventa « ionizzato ».

Questi fatti formano la base di tutti i fenomeni di elettro-dinamica, di magnetismo e di induzione.

Le forze dovute al movimento degli elettroni, degli atomi positivi o di altri corpi carichi nell'etere diconsi forze magnetiche.

Prendiamo un filo di rame avente 1 mm. di raggio, tendiamolo attraverso alla stanza e lanciamo in esso una corrente di 1 ampère. Quale sarà la forza magnetica svolta dal movimento di questi elettroni?

Anzitutto occorre avere qualche nozione della velocità con cui gli elettroni percorrono il filo. Essi viaggiano in una direzione opposta a quella di ciò che fu chiamato fino ad ora la « corrente elettrica ». Essi vanno dallo zinco al rame in una pila elettrica, o generalmente dal polo negativo al positivo. Non si verifica però spostamento sensibile degli atomi positivi o neutri. Essi sono solidamente compatti fra loro e non possono emigrare, cosicchè gli elettroni si aprono il passaggio fra essi e progrediscono con una velocità media costante che è direttamente proporzionale alla forza elettromotrice che li trascina. Il movimento degli elettroni costituisce la vera corrente elettrica e produce tutti gli effetti termici e magnetici che dipendono da una corrente elettrica.

Il passaggio di un ampère attraverso ad una sezione qualsiasi del filo significa il passaggio di un' « armata » costituita da 8,79 trilioni di elettroni attraverso alla stessa sezione ad ogni secondo (p. 98). Questo numero di elettroni, che nella mia esposizione figurativa della teoria degli elettroni io ho chiamato un' « armata », viene comunemente indicato col nome di un « coulomb » di elettricità negativa. Esso comprende 3000 milioni di « compagnie », ossia di unità elettro-

statiche le quali contengono ciascuna 2930 elettroni. Possiamo dire quindi che un' « armata » elettrica contiene all'incirca tante compagnie quante unità sono contenute nelle singole compagnie.

Supponiamo che un'armata di elettroni attraversi il punto A del conduttore AB. Essa impiegherà un secondo per passare tutta nel punto A. Vogliamo sapere dove sarà la testa dell'armata quando la retroguardia sarà giunta in A. Per riuscirvi basterà trovare quale sia la lunghezza di quello stesso filo sufficiente a contenere un'armata di elettroni atti al trasporto dell'elettricità. Abbiamo calcolato in 380 trilioni (p. 98) il numero di elettroni atti al trasporto contenuti in un cm^3 di rame. Un'armata di 8,79 trilioni è quindi contenuta da ogni $\frac{8,79}{380}cm^3$, o 0,023 cm^3 di rame.

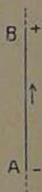



Fig. 20.

Poichè il raggio del nostro filo di rame è di 1 mm., la sua area è di 0,01 π cm^2, ed il suo volume per la lunghezza di 1 cm. è di 0,01 π cm^3, ossia 0,0314 cm^3; quindi la lunghezza del filo di rame richiesto per contenere un'armata di elettroni suscettibili di spostamento è di:

$$\frac{0,023}{0,0314} = 0,723 \text{ cm.}$$

Cosicchè, nell'istante in cui la retroguardia passa in A, la testa della colonna trovasi ad una distanza di 0,723 cm. più innanzi e la retroguardia si troverà in questo stesso punto dopo

lo spazio di un secondo. In altre parole, la velocità con cui l'armata procede è di 0,723 cm. al secondo.

Questa è la velocità degli elettroni in un filo di rame di 2 mm. di diametro portante la corrente di 1 ampère. Raddoppiare questa corrente significa raddoppiare la velocità degli elettroni, e quindi quadruplicare la loro energia che varia col quadrato della velocità, e quadruplicare il calore. Raddoppiare la resistenza lasciando immutata la corrente significa pure raddoppiare la velocità; ma poichè il numero degli elettroni per unità di lunghezza è dimezzato, ne risulta che il calore svolto nell'unità di lunghezza è soltanto raddoppiato anzichè quadruplicato (legge di Joule).

La forza magnetica non dipende in modo alcuno dalla resistenza opposta dal filo, ma solamente dal numero e dalla velocità degli elettroni, cioè dal loro momento, $m v$.

La forza magnetica può venire constatata mediante un piccolo ago magnetico che si dispone di per sè ad angolo retto colla corrente: questo è l'antico modo di misurare una corrente. Ma oggidì dobbiamo procedere con criteri diversi in questo ordine di fenomeni. Magneti, magnetismo, magnetizzazione si devono collegare alla distribuzione ed al movimento degli elettroni. Un magnete è un sistema complicato per filare, per così dire, gli elettroni. Non è basato su alcun principio fondamentale. Il fatto che il sistema delle unità elettromagnetiche è basato

sulla definizione di un polo magnetico unitario, prova semplicemente la violenza della lotta a cui le vecchie teorie dovettero assoggettarsi quando vennero portate a confronto colle forze magnetiche. Il polo magnetico, essendo cosa di ignota natura, dovette essere considerato come una quantità elementare non suscettibile di venire assimilata a qualche noto principio, appunto come l'acqua si considerò come un elemento fino a tanto che non riuscì a Cavendish di analizzarla. Le correnti elettriche si misurano mediante un magnete, invece di invertire le parti, ma nella futura scienza dell'elettricità il polo magnetico sarà chiamato a rappresentare una parte molto insignificante.

Come potremo ora misurare la forza magnetica dovuta agli elettroni percorrenti il filo?

È evidente che i soli elettroni producono la forza magnetica; infatti gli atomi positivi sono in riposo. Essi sono eguali in numero agli elettroni e quindi il filo considerato come un tutto non ha carica elettrica. La forza magnetica non può venire scoperta mediante un corpo elettrico in riposo, poichè la forza magnetica agisce soltanto fra corpi che si spostano nella stessa direzione, relativamente all'etere. Essi devono essere animati da un movimento assoluto attraverso all'etere; il loro movimento relativo non sarebbe sufficiente. Quando un corpo carico si sposta nell'etere mentre che un altro corpo è in riposo non si sviluppa fra essi alcuna forza magnetica. L'etere, nella teoria degli elettroni, si suppone

come in riposo assoluto e come formante la base immobile alla quale si riferiscono in quantità assolute le misure di ogni movimento. Vi è quindi nella teoria degli elettroni ciò che si indica col nome di movimento assoluto, anzi da esso deriva appunto la forza magnetica. Il più grande movimento assoluto che possiamo praticamente conoscere è quello della terra attorno al sole, che è di 3.000.000 cm. al secondo, o di 19 miglia al secondo. Questo valore è $\frac{1}{10\,000}$ della velocità della luce, cosicchè due corpi carichi collocati nell'ora di mezzogiorno ad angolo retto coi raggi del sole nel piano del meridiano, perderebbero soltanto 0,01 per cento della loro reciproca attrazione, ma ciò non avverrebbe se fossero disposti uno a est e l'altro a ovest. Questo esperimento potrà forse venire tentato un giorno, ma le difficoltà sono molto grandi poichè la carica di un conduttore viene facilmente dispersa mediante gli ioni dell'aria, ed inoltre le fonti di errore sono numerosissime.

Il fatto che si rivela una forza magnetica anche quando gli elettroni si spostano colla piccola velocità di 1 cm. circa al secondo è dovuta alle immense quantità di elettricità messe in azione in un filo, quantità che non potremo mai sperare di ottenere separatamente. Qualunque sia la forza magnetica che gli elettroni potrebbero esercitare a cagione del movimento della terra, essa è compensata dalla forza magnetica esercitata dagli atomi positivi per la stessa cagione del movi-

mento della terra. Queste due forze si controbilanciano esattamente e la sola forza rimanente è quella degli elettroni relativamente agli atomi positivi, cioè relativamente al filo stesso.

Ecco il perchè noi possiamo, trattando del magnetismo, considerare l'etere come fisso rispetto alla terra, fino a tanto che non si tratti di corpi che possiedono una carica libera. La forza magnetica fra due elettroni in movimento è inversamente proporzionale al quadrato della distanza. La forza magnetica esercitata da un filo infinitamente lungo contenente elettroni in movimento, sopra un elettrone che si sposti parallelamente al filo stesso, è semplicemente inversamente proporzionale alla distanza. Supponiamo infatti di collocare un elettrone in E (fig. 21), che si muova parallelamente al filo AB, e indichiamo con ds una piccola porzione del filo. La forza magnetica esercitata su E è proporzionale a $\frac{sen\,\theta}{d^2}$ poichè l'elettrone non si sposta lungo ds. La forza totale esercitata dalla porzione del filo al disopra di A nella direzione di r è proporzionale a $\frac{i}{r}$, in cui i è la corrente ed r la distanza. Una forza simile è esercitata dal filo al disotto di A, cosicchè la forza totale è eguale a $\frac{2\,i}{r}$. La forza magnetica intorno ad

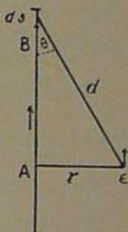



Fig. 21.

un filo diminuisce quindi coll'aumentare della distanza. Essa può venire misurata portando un'altra corrente i' entro la distanza di r centimetri dal filo. Quindi la forza di attrazione esercitata su 1 cm. di filo, portante la corrente i', dal tubo infinito portante la corrente i, è

$$\frac{2\,i\,i'}{r} \text{ dine.}$$

Se i e i' sono di 10 ampères ciascuno e r è eguale ad 1 cm., la forza sarà di 2 dine. Perciò una corrente eguale a 10 ampères è detta « unità elettromagnetica assoluta d'intensità di una corrente ». Essa è 10 volte più grande dell'unità pratica: l'ampère.

In pratica è impossibile di esperimentare con un filo infinito e con una corrente elementare. Dobbiamo quindi cercare un metodo più pratico per la determinazione dell'ampère.

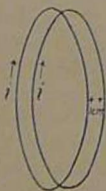



Fig. 22.

Prendiamo due fili ciascuno della lunghezza di 100 cm. e incurviamoli a forma di anelli. Disponiamoli in due piani paralleli distanti 1 cm. e facciamo percorrere ciascuno di essi da una corrente di 1 ampère. Ciò può venire effettuato o inserendo una debole batteria in un punto qualsiasi di ciascun anello, oppure collegando ciascuno degli stessi ad una batteria mediante una piccola interruzione dell'anello. Se le due correnti procedono nella stessa direzione esse si attrarranno a vicenda

colla forza di 2 dine. Se invece le correnti procedono in direzioni opposte, esse si respingeranno colla stessa forza.

Così arriviamo alla seguente definizione dell'ampère, definizione affatto indipendente dai magneti:

Un ampère è quella corrente che, attraversando due conduttori circolari di 1 m. di circonferenza e nella stessa direzione, provoca nei conduttori stessi una forza attrattiva pari a 2 dine quando sia interposta la distanza di 1 cm.

E per esporre il fatto in modo più generale diremo che l'attrazione fra i due circuiti è di $\frac{2\,c\,i^2}{d}$, in cui c è la circonferenza in metri, i la corrente in ampères, e d la distanza fra i due cerchi espressa in centimetri.

Abbiamo così due definizioni dell'ampère: secondo la prima esso è il passaggio di 8,79 trilioni di elettroni al secondo; questa può venire chiamata la definizione *chimica*; secondo l'altra definizione esso è la corrente che esercita una determinata forza magnetica, e questa è la definizione *elettromagnetica* della stessa quantità. Entrambe queste definizioni sono esatte ed esaurienti, ma la definizione chimica è la fondamentale. Non bisogna dimenticare che le correnti possono venire misurate con la più grande esattezza, non per mezzo della loro forza magnetica, ma mediante il passaggio degli elettroni che le compongono, attraverso ad un liquido, come nell'elettrolisi del nitrato d'argento o del solfato di rame.

Se la corrente venisse portata a tale intensità che gli elettroni potessero assumere la velocità della luce nell'attraversare il filo, l'attrazione sarebbe tale da controbilanciare l'enorme forza di ripulsione agente fra le 138 armate di elettroni contenute in ogni circuito, forza mascherata dalla presenza degli atomi positivi.

Il fatto che la forza è inversamente proporzionale alla distanza dimostra che i due circuiti tenderanno ad avvicinarsi uno all'altro con forza crescente, fino a tanto che verranno a coincidere. Se uno dei due cerchi è un poco più piccolo dell'altro, l'attrazione massima si verifica ad una distanza eguale alla differenza dei loro raggi. In ogni caso la forza magnetica è ad angolo retto colla corrente. A qualsiasi punto dello spazio la forza magnetica può essere misurata in dine in base alla forza massima esercitata dalla lunghezza di 1 cm. di un filo portante l'unità di corrente.

Così la forza magnetica nel centro di un circolo dovuta alla corrente che ne percorre la circonferenza è di

$$\frac{2\pi i}{r}.$$

Questa formola è il fondamento per la misurazione delle correnti mediante piccoli magneti.

Se si avvolge un cilindro con un filo percorso da una corrente i, la forza magnetica nel suo interno è ovunque la stessa ed è eguale a $4\pi n i$, in cui n è il numero dei giri per centimetro.

Un cilindro di questo genere dicesi un solenoide e forma un magnete artificiale senza ferro.

La forza magnetica dovuta ad un lungo filo percorso da una corrente di un ampère è di $\frac{1}{5}$ di dina alla distanza di 1 cm. da esso. Questa forza è presso a poco eguale alla forza magnetica orizzontale della terra. È la forza sopportata da una lunghezza di 1 cm. di un filo portante una corrente di 10 ampères, che venga posto alla distanza di 1 cm. dal primo filo.

Quando due correnti si incrociano formando un angolo esse tendono a coincidere ed a fluire lato a lato nella stessa direzione. Correnti che affluiscono verso uno stesso punto o che partono da uno stesso punto si attraggono reciprocamente. Se (v. fig. 23, *a*) la corrente i fosse fissa e la corrente i' mobile, quest'ultima verrebbe spostata circolarmente nella direzione indicata dalle freccie. Se all'istante in cui incrocierebbe la corrente i, la i' venisse invertita, essa verrebbe respinta e spostata circolarmente in direzione opposta. Invertendo la corrente ad ogni crocicchio si potrebbe produrre una rotazione continua; infatti venne costruita una macchina agente in questo modo. Se (v. fig. 23, *b*) i' fosse libera di spostarsi soltanto in direzione ad angolo retto, essa verrebbe spinta nella direzione mo-

a

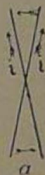
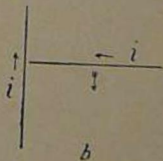



Fig. 23, *a*.

Fig. 23, *b*.

strata dalla freccia. Se i fosse piegata in circolo orizzontale ed i' fosse mobile lungo lo stesso, esso ruoterebbe continuamente, come avviene nella macchina ideata da Ampère.

Ci siamo occupati degli elettroni in movimento in un filo come del caso più semplice di attrazione elettro-dinamica. Ma un'attrazione si verifica anche nel caso di cariche elettriche libere. Se si montano parecchi nodi metallici sopra una ruota di ebonite e quindi si caricano elettricamente e si impartisce alla ruota un movimento di rotazione, le cariche formano una corrente di forza $n\ e\ v$, in cui e è la carica di ciascun nodo espressa in « armate », ossia in « coulombs », n è il numero dei nodi e v è la loro velocità. Così se vi fossero 1000 nodi carichi ciascuno con 300 compagnie di elettroni (10^{-7} armate) e la velocità periferica fosse di 100 cm. al secondo, la corrente sarebbe di $100 \times 1000 \times 10^{-7}$, ossia $\frac{1}{100}$ di ampère. Correnti di questa specie furono ottenute da Rowland facendo girare un disco provvisto di settori metallici. Due di queste ruote o di questi dischi si attraggono reciprocamente appunto come le correnti che percorrono un filo, ma l'attrazione avendo soltanto la forza di un milionesimo di gramma, risulta pressochè impossibile misurarla.

Gli elettroni si influenzano quindi reciprocamente quando viaggiano liberi, e allora la forza magnetica fra essi è proporzionale alla loro velocità in un dato momento, ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li

separa. Se gli elettroni si spostano lungo linee parallele ma non su uno stesso piano, la forza deve essere moltiplicata per il seno dell'angolo formato dalle loro direzioni di movimento e dalla linea che le congiunge. Se viaggiano in direzioni diverse, la forza deve essere moltiplicata per il coseno dell'angolo formato dalle direzioni del loro movimento.

Abbiamo così determinato le forze agenti fra gli elettroni. Esse consistono di una forza elettrostatica che può venire considerata come invariabile e di una forza elettro-magnetica che dipende dalla velocità e dalla direzione degli elettroni stessi. Una chiara cognizione dell'azione di queste due forze è il primo passo essenziale per poter comprendere lo svolgimento dei fenomeni elettro-magnetici.

CAPITOLO VIII.

Magnetismo.

Abbiamo visto nel capitolo precedente come la forza magnetica sia dovuta al movimento uniforme degli elettroni o dei corpi carichi in generale, e come la forza magnetica esercitata da un conduttore metallico trasportante una corrente sia dovuta unicamente al moto degli elettroni che costituiscono la corrente stessa. Abbiamo inoltre veduto come la forza magnetica si eserciti soltanto sopra altri elettroni o corpi carichi in movimento, ma non su corpi elettrizzati e in riposo.

Mi propongo ora di dimostrare che il magnetismo consiste nel moto uniforme degli elettroni lungo piccole orbite e che tutte le proprietà magnetiche dei corpi possono venire spiegate in base a questo principio. Per « magnetismo » io intendo quella proprietà dei corpi per cui essi esercitano una forza magnetica senza che alcuna corrente elettrica percettibile li percorra o li avvolga.

In linea generale la teoria degli elettroni applicata al magnetismo viene formulata nel modo seguente: Gli atomi di tutti i corpi sono circondati da parecchi elettroni che percorrono delle orbite intorno ad essi, appunto come i pianeti intorno al sole. Quando queste orbite sono contenute press'a poco in uno stesso piano, come nel sistema solare, i corpi sono « magnetici », o piuttosto « paramagnetici », come, ad es., l'ossigeno e l'alluminio. Quando inoltre le orbite sono grandi abbastanza da potersi influenzare reciprocamente attraverso la distanza media che separa gli atomi, i corpi sono « ferromagnetici », come il ferro, il cobalto, ed il nichelio. Quando per contro le orbite di elettroni ruotanti intorno ad uno stesso atomo giacciono in piani diversi, i corpi non sono paramagnetici. Essi vengono comunemente denominati « diamagnetici ». Ma in realtà *tutti* i corpi sono diamagnetici ed il paramagnetismo è una proprietà speciale che maschera il diamagnetismo inerente ai corpi. Un magnete permanente è un corpo paramagnetico in cui le orbite della maggioranza degli elettroni sono collocate in piani paralleli, compiendosi le rivoluzioni nello stesso senso, questo parallelismo essendo mantenuto a cagione della reciproca attrazione delle orbite.

Questi, in breve, sono i principî essenziali del magnetismo esposti secondo la nuova teoria, la cui applicazione vittoriosa al magnetismo è dovuta essenzialmente al professore Langevin di Parigi.

Non esiste alcun « fluido magnetico » nè « ma-

gnetismo libero », nè esistono « poli magnetici ». Nella teoria degli elettroni, il magnetismo come entità distinta scompare e si risolve nel moto uniforme degli elettroni. Così si distrugge una concezione che condusse nel tempo a così numerosi equivoci ed a falsi ragionamenti, come forse non accadde per altro ramo di scienza.

Ho spiegato più sopra (p. 171) che si può costruire un magnete artificiale senza ferro, avvolgendo un filo su un cilindro e lanciando nel suo interno una corrente. Se la corrente che percorre il filo è un'unità elettromagnetica (= 10 ampères) e il filo compie n giri per ogni centimetro di lunghezza del cilindro, la forza magnetica al centro dell'avvolgimento è di $4 \pi n$ dine. In altre parole se i è la corrente e n il numero dei giri, la corrente totale circolante intorno ad ogni centimetro di lunghezza del solenoide è $n\, i$. Questa corrente totale per ciascuna unità di lunghezza chiameremo « I unità elettro-magnetiche » ossia « 10 I ampères ». Questo valore è identico a quello noto sotto il nome di intensità di magnetizzazione I.

Un corpo possiede l'unità di intensità di magnetizzazione quando una corrente totale di 10 ampère circola intorno alla sua unità di lunghezza, questa lunghezza essendo misurata nella direzione dell'asse magnetico.

Procederemo ora a spiegare come un magnete permanente possa venire considerato come un corpo attorno al quale circola continuamente una corrente di elettroni.

L'idea che un magnete è costituito da innumerevoli piccoli magneti di dimensioni molecolari, risale a circa 80 anni fa. Essa era stata proposta da Ampère per spiegare il fatto che quando un magnete viene diviso in parti anche piccolissime, ciascun frammento è un magnete completo. Sapendo ora che una corrente elettrica ne attira o ne respinge un'altra a seconda della sua direzione, egli suppone che ciascuna molecola di una sostanza magnetica fosse avvolta da una corrente elettrica. Però, siccome egli considerava l'elettricità come un fluido imponderabile, non gli era possibile spiegare la costituzione di questa corrente misteriosa. Fino al sorgere della teoria degli elettroni non fu possibile approfondire questo concetto ulteriormente, quantunque esso fosse stato applicato con successo alla spiegazione dei fenomeni magnetici dal Weber, e più tardi dall'Ewing.

Ampère propose inoltre una ingegnosa e utile spiegazione del fatto, che un grande numero di piccole correnti molecolari possono costituire un potente magnete.

Se le molecole hanno sezione quadrata e sono serrate le une presso le altre e ciascuna molecola è percorsa da una corrente nella direzione delle lancette di un orologio, possiamo rappresentare col diagramma a fig. 24 una piccola sezione attraverso un ago magnetico, con forte ingrandimento. Ovunque due molecole si toccano esistono due correnti in direzioni opposte, le quali, naturalmente, si neutralizzano a

vicenda cosicchè l'effetto magnetico esercitato fuori del magnete è dovuto unicamente alle correnti che percorrono il lato libero delle molecole. L'effetto risultante è quindi eguale a quello

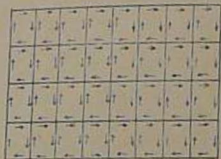



Fig. 24.

che si produrrebbe se una corrente simile a quella molecolare percorresse il perimetro della sezione. È ovvio che qualsiasi sezione venga scelta (cioè qualunque sia il numero delle molecole che essa contiene); la corrente che ne percorre il perimetro è sempre la stessa, essendo eguale alla corrente molecolare che è invariabile.

Al posto della misteriosa corrente molecolare di Ampère, noi sostituiamo gli elettroni in rivoluzione o piuttosto definiamo la corrente molecolare come uno spostamento di elettricità rappresentata dagli elettroni in rivoluzione intorno a ciascun atomo positivo.

Il ragionamento sopra esposto rimane sostanzialmente invariato. In realtà gli elettroni non percorrono un quadrato, ma l'errore che si introduce supponendo il loro percorso come un quadrato non è grande e per contro si raggiunge

con tale supposizione una notevole facilità di calcolo.

Anche ora sono soltanto gli elettroni percorrenti la linea limite quelli che esercitano un effetto all'esterno e la corrente nel perimetro della sezione è eguale alla corrente molecolare, la quale, espressa in ampères, è eguale al numero delle armate di elettroni che passano per un punto qualsiasi preso sulla linea limite esterna, in un secondo.

Questa teoria può venire quantitativamente esperimentata nel modo seguente (il calcolo dà risultati soltanto approssimativi, ma, quantunque molti dati siano incerti, dimostra tuttavia che la teoria degli elettroni applicata al magnetismo non porta a risultati assurdi quando la si esprime in numeri):

Si suppone, con fondamento, che un centimetro cubo di ferro contenga circa 10^{24} (un quadrilione) di atomi. Supponendo che vi siano 10^8 atomi disposti intorno a ciascun vertice del cubo, il numero totale sarà appunto 10^{24}. Ora supponiamo che ogni atomo abbia un elettrone in rivoluzione intorno a sè stesso e che tutti i circuiti si affaccino su una faccia del cubo; vi sarà una corrente che circola intorno ai quattro lati adiacenti. La corrente molecolare computata in elettroni al secondo, è misurata dal numero di rivoluzioni compiute dall'elettrone intorno al suo atomo ad ogni secondo. Questo, secondo il calcolo esposto a p. 35, è eguale a $2,2 \times 10^{15}$. Moltiplicando questo numero per 10^8, il numero

di atomi collocati lungo ciascun vertice, otteniamo per la corrente totale circolante intorno al cubo (in altre parole per la sua « intensità di magnetizzazione » il valore:

$$2,2 \times 10^{15} \times 10^{8} = 2,2 \times 10^{23}$$

elettroni al secondo. Poichè un ampère è la corrente di $8,79 \times 10^{18}$ elettroni al secondo, la corrente sopra indicata, espressa in ampères, sarà di:

$$\frac{2,2 \times 10^{23}}{8,79 \times 10^{18}} = 25.100 \text{ ampères.}$$

Pare incredibile che una corrente così enorme possa circolare intorno ad un frammento di ferro dello spessore di un dito senza ridurlo in fiamma. Ma dobbiamo tenere presente che la corrente non riscalda il filo a cagione del moto degli elettroni, ma a cagione del fatto che il loro movimento, acquistato per la forza elettrica, è arrestato continuamente dalle successive collisioni. Nei metalli magnetici gli elettroni sono liberi di compiere le loro rivoluzioni e compiendole essi consumano una piccolissima quantità di energia.

La più grande intensità di magnetizzazione fino ad oggi osservata è quella di 1700 unità, il che significa che una corrente di 17.000 ampères circola intorno a ciascun centimetro in lunghezza di una sbarra di ferro magnetizzato fino a saturazione. La correlazione fra questi due valori, cioè fra 25.000 ampères per la saturazione teorica assoluta e 17.000 come la più

alta saturazione praticamente ottenuta, è assai soddisfacente. Ma non si deve attribuire a questo fatto troppa importanza. Il calcolo è diretto soltanto a dimostrare che la teoria degli elettroni si applica al magnetismo con successo, tanto dal lato quantitativo che dal lato qualificativo. Per calcolare la magnetizzazione di sostanze differenti dovremo prima scoprire altri valori relativi al numero degli elettroni in rivoluzione intorno a ciascun atomo, la velocità delle loro rivoluzioni e le dimensioni delle loro orbite.

Nel calcolo sopra riportato ho supposto che un solo elettrone girasse intorno a ciascun atomo: questa supposizione si collega alla osservazione che ciascun atomo può perdere soltanto uno o due, o al più tre, elettroni. Non ne consegue però che gli atomi contengano soltanto da uno a tre elettroni. La concezione moderna è che la massa di un atomo contiene un numero più grande di elettroni collegati fra loro da un qualche corpo elettrico positivo fino ad ora misterioso. Thomson suppone che questi elettroni girino entro il corpo positivo e siano influenzati da forze magnetiche. Essi ruotano probabilmente in piani di qualsiasi posizione, formando per tal modo un atomo diamagnetico nel senso comunemente inteso. L'elettrone separabile probabilmente gira ad una distanza più grande, press'a poco come accade per Nettuno e le comete del sistema solare, ed esso deve la sua predominante forza magnetica appunto alla grandezza della sua orbita. Come vedremo in seguito, due orbite eser-

citano una influenza reciproca proporzionale alle loro aree. Nei corpi ferromagnetici, come nel ferro, pochi elettroni devono possedere orbite eccezionalmente ampie. Nel ferro dolce non magnetizzato queste orbite sono riunite in piccoli gruppi. Quando il ferro dolce è portato in un campo di forza magnetica, le orbite, che possiamo chiamare anche le correnti molecolari, girano fino a tanto che il loro campo magnetico proprio coincide col campo magnetico esterno. Il ferro è « magnetizzato ». È superfluo dire che l'aggiunta di tutti questi campi molecolari al campo esterno rinforza in misura notevole il campo primitivo. Sarebbe necessaria un'energia assai grande per costringere una corrente di 25.000 ampères a circolare nello spazio di 1 cm^3. Ma è appunto coll'aiuto delle correnti molecolari (correnti preesistenti, richiedendosi soltanto la « rotazione » di esse) che otteniamo i potenti campi magnetici risultanti dagli elettromagneti.

Quando il campo magnetico esterno viene allontanato, può accadere che la maggioranza delle correnti molecolari rimanga nella nuova posizione assunta, essendovi trattenuta dalla reciproca attrazione fra le correnti. In questo caso abbiamo il « magnetismo residuo ». Nel ferro dolce questo magnetismo residuo ammonta all'80 % circa del magnetismo indotto da potenti campi magnetici. Ma il minimo urto o qualsiasi turbamento meccanico riconduce le correnti molecolari nel loro stato primitivo di confusione.

Nell'acciaio per contro, il magnetismo residuo si conserva anche quando il campo venga invertito, fino a che esso non acquisti nuovamente una forza notevole. Questo indica che nell'acciaio le orbite sono così ampie o così vicine fra loro che una volta che sono allineate si richiede una forza notevole per ricondurle nella posizione precedente.

Questo ci porta alla considerazione dei « momenti » magnetici. La coppia ruotante originata da una corrente molecolare o da qualsiasi altra corrente in un campo magnetico è proporzionale al momento della stessa. Questo momento si compone di due fattori, uno dei quali è la intensità della corrente e l'altro l'area intorno alla quale essa circola. Se l'intensità di una corrente molecolare è di 10 ampères, e la sua area di 1 cm^2, esso esercita nell'unità di campo magnetico una coppia massima eguale a 1 cent.-dina.

In generale un circuito di area A con intensità di corrente i ha un movimento $= A\,i$.

Se la corrente in un solenoide è eguale a I unità elettro-magnetiche per ogni cm. di lunghezza, la sua area sezionale A cm^2, e la sua lunghezza l, allora il suo momento magnetico è $I\,A\,l$. Il prodotto IA, ossia: corrente per unità di lunghezza $\times$ area sezionale, dicesi « l'energia polare » del solenoide o di altro magnete. Questo nome è giustificato dal fatto che, per quanto si riferisce alla forza esterna del magnete, essa può venire attribuita a due centri situati ai due estremi, o presso ai due estremi, liberi del ma-

gnete, aventi una « forza » eguale al prodotto dell'intensità negativa per l'area. Questi poli non sono altro che finzioni matematiche artificiali, tanto che se la sbarra è incurvata in modo da formare un circolo completo, i poli scompaiono quantunque le correnti molecolari rimangano pressochè invariate.

Il momento magnetico di una sbarra magnetica di lunghezza l, ed avente un polo magnetico IA è eguale a I A l. Ossia, se si esprime con m il prodotto IA, il momento è eguale ad $m\,l$. Cioè: il momento di una sbarra magnetica si ottiene moltiplicando la sua forza polare per la sua lunghezza. Il polo magnetico unitario è posseduto da una sbarra la cui area sezionale moltiplicata per la corrente totale circolante intorno ad essa per l'unità di lunghezza, è eguale all'unità. Cioè: *se le correnti molecolari circolanti intorno a una sbarra di 1 cm² di sezione ammontano a 10 ampères per ogni cm. di lunghezza, tale sbarra possiede l'unità di poli magnetici.* Se questa sbarra ha la lunghezza di 1 centimetro, essa avrà ancora l'unità di momento magnetico.

Il momento magnetico determina la forza magnetica esercitata da un circuito o da un solenoide ad un punto qualsiasi molto lontano in paragone colla lunghezza di esso. Se si sceglie a caso uno di questi punti, la forza aumenta in proporzione diretta del momento. Così la forza esercitata da una piccola sbarra magnetica o da un ago magnetico può venire raddoppiata col

raddoppiare o la sua lunghezza o la sua forza polare. La forza esercitata da una corrente molecolare o da un altro piccolo circuito piano può venire raddoppiata raddoppiandone o la corrente o l'area. In entrambi questi casi il procedimento è essenzialmente identico. In una sbarra magnetica la corrente può venire raddoppiata soltanto col raddoppiarne la lunghezza, poichè le correnti molecolari non possono venire alterate. La corrente polare può venire raddoppiata col raddoppiare o I o A. Se si adoperano sbarre di acciaio, I è limitato da un certo massimo (17.000 ampères per ogni cm. di lunghezza) e la forza polare può venire raddoppiata soltanto col raddoppiare l'area, come nel caso del circuito. La analogia fra circuiti e magneti è quindi assai poco pronunziata. Le differenze fra essi sono dovute alla grande forza delle correnti molecolari. Questa forza così potente, se pure offre grandi vantaggi, offre tuttavia l'inconveniente che le correnti molecolari cadono facilmente fuori di allineamento, risultandone una smagnetizzazione. I solenoidi e gli altri magneti artificiali sono assai più deboli dei magneti che contengono del ferro, ma sono assai più degni d'affidamento dei magneti permanenti. I magneti migliori e più forti sono costituiti combinando queste due forme riunendosi per tal modo la sicurezza del solenoide e la forza del magnete di ferro. Tali combinazioni, che si attuano avvolgendo un filo percorso da corrente intorno a una sbarra di ferro dolce, sono note col nome di « elettro-magneti ».

Per spiegare l'analogia fra i magneti ed i solenoidi è necessario di approfondire un poco la natura del polo magnetico. La concezione dei poli, quantunque conduca a molti equivoci, non è però completamente inutile. Ad essa si devono molte abbreviazioni di termini usati nelle scienze fisiche, essa ci guidò alla formazione delle prime idee relative all'azione di un campo magnetico sopra un ago magnetico. Ma quando si tentò di estendere questa concezione fino a dedurne una spiegazione della natura del magnetismo, essa non soltanto fallì, ma ritardò di molti anni qualsiasi progresso verso la verità.

L'azione magnetica di un solenoide lungo e sottile, come quella di un magnete parimenti lungo e sottile, può venire considerata come concentrata in due punti molto prossimi ai suoi estremi, detti poli. Ma ogni giro del solenoide, come pure ogni sezione del magnete, esercita la sua forza magnetica *in modo affatto indipendente* dall'azione degli altri giri o sezioni. La sua azione cioè non è annullata nè « neutralizzata » da quella delle altre parti. Essa persiste inalterata e se pure vi sia un giro nel centro del solenoide che appare come neutro è soltanto perchè non adoperiamo mezzi adatti a scoprirne l'azione magnetica.

Il fatto che l'azione appare come concentrata nei poli è, per così dire, un'illusione dovuta al modo peculiare in cui le azioni dei singoli giri si sommano.

Consideriamo due solenoidi di lunghezza eguale

ma di diverso spessore (fig. 25), disposti uno entro l'altro. Le correnti degli elettroni (supponendo di guardarle dall'estremità di sinistra), appaiono tutte come ruotanti nella direzione delle

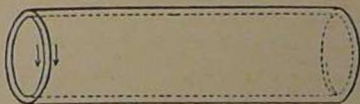



Fig. 25.

lancette di un orologio. Esse si attraggono quindi reciprocamente, e siccome esse sono già tanto vicine le une alle altre quanto lo possono essere, non modificherebbero per nulla la loro posizione relativa anche se fossero libere di spostarsi. In altre parole, non vi è alcuna forza risultante agente

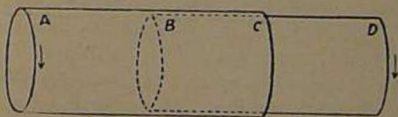



Fig. 26.

su di esse: e cioè esse sono in posizione d'equilibrio. Supponiamo ora di trarre verso l'esterno il piccolo solenoide (fig. 26) senza estrarlo completamente dal grande solenoide. Allora le due porzioni fra B e C sono in equilibrio come prima relativamente l'una all'altra; ma le porzioni

AB e CD non sono più in equilibrio. La porzione AB attira ciascun giro del piccolo solenoide. L'attrazione è proporzionale al momento di ciascun giro del solenoide maggiore, ed inversamente proporzionale al cubo della distanza. D'altra parte l'attrazione è direttamente proporzionale al numero di giri contenuti fra A e B. Se AB = l, abbiamo un'attrazione proporzionale a $\frac{1}{l^3}$ ed anche a l stesso. Il risultato è che essa è proporzionale a $\frac{l}{l^3}$ ossia $\frac{1}{l^2}$. È inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Il ragionamento sopra esposto presuppone che la lunghezza dei solenoidi sia grande relativamente ai loro diametri. Questa supposizione non pregiudica, poichè senza di essa non si potrebbe parlare mai di poli nemmeno nelle sbarre magnetiche.

Se si inverte uno dei solenoidi, l'attrazione si muterà in ripulsione, ed il piccolo solenoide sarà espulso da quello grande. Se i due solenoidi sono disposti uno a lato dell'altro nella stessa direzione, le correnti che procedono nella stessa direzione saranno adiacenti le une alle altre e si attrarranno reciprocamente. Se i solenoidi si dispongono lato a lato, ma non colle estremità adiacenti, essi tenderanno a muovere in modo da riunire le loro estremità onde avvicinare per quanto è possibile le correnti a reciproca attrazione ed a renderle più numerose che sia possisibile. Anche qui abbiamo l'illusione di un'azione polare. Ma siccome le correnti hanno

un punto solo di contatto, l'attrazione è assai più debole che non quando un solenoide è contenuto nell'altro.

La legge dell'inversità del quadrato può essere dedotta da un principio generale del calcolo integrale. Questo principio, suscettibile di molte utili applicazioni, è il seguente: Quando una forza esercitata da una linea infinita sopra un punto esterno ad essa varia secondo la n^{ma} potenza della distanza che separa il punto da un elemento della linea, la forza totale esercitata dalla linea infinita varia secondo la $(n + 1)^{ma}$ potenza della distanza che separa il punto dalla linea. Così, se il punto è un elettrone e la linea è formata da elettroni, la ripulsione fra l'elettrone e ciascun elemento della linea varia in ragione inversa del quadrato della distanza, cioè come la $(-2)^{ma}$ potenza della distanza. Quindi la ripulsione totale varia come la $(-1)^{ma}$ potenza della distanza, cioè in ragione inversa della distanza.

La forza magnetica esercitata da un piccolo circuito varia in ragione inversa del cubo della distanza. Quindi la forza magnetica esercitata da una linea infinita intrecciata con tali circuiti varia in ragione inversa del quadrato della distanza. Poichè, nel caso di un circuito collocato esternamente ad un solenoide infinito, la forza è parallela al solenoide stesso, ed eguale in entrambe le direzioni, le due metà di un solenoide infinito si compenseranno a vicenda, e la forza risultante sarà eguale a zero. Ma se il solenoide è infinito in una sola direzione, si mostrerà una

forza risultante inversamente proporzionale al quadrato della distanza a partire dall'estremità. Questa forza sarà dovuta, apparentemente, alla esistenza dell'estremità; cioè, essendo grandissima in tale estremità, essa apparirà come concentrata in essa. In breve l'illusione dell'esistenza di un « polo » magnetico è perfetta.

Supponendo di immergere questa estremità in limatura di ferro, molti frammenti verranno magnetizzati ed aderiranno gli uni agli altri. L'adesione sarà più forte dove i circuiti molecolari potranno disporsi parallelamente ai circuiti del solenoide, così da formare un turbinare di correnti molecolari a partire dall'estremità del solenoide. Il solenoide ha dei « poli » così come li hanno le sbarre magnetiche, nè più nè meno.

L'energia polare è unitaria, come ho detto sopra, quando il prodotto dell'area sezionale del solenoide per la corrente totale in ogni cm. di lunghezza è eguale all'unità. Se l'area sezionale è di un mm. quadrato, la corrente per ogni cm. di lunghezza deve essere di 100 unità elettromagnetiche o 1000 ampères, poichè 1 $cm^2 = 100\ mm^2$. Il polo di questo solenoide è quindi un polo unitario. Il polo di un magnete della stessa sezione avente una corrente di 1000 ampères circolante intorno ad ogni cm. in lunghezza è anche un polo unitario. Entrambi questi poli unitari hanno una proprietà importante. *Un polo magnetico unitario collocato ad una distanza di 1 cm. nell'aria da un altro polo dello stesso segno lo respinge colla forza di una dina.*

Questa è la legge su cui è fondato il sistema delle unità di misura elettro-magnetiche. Il sistema delle unità elettrostatiche, per contro, è basato sulla legge dell'inversità dei quadrati che governa le forze agenti fra quantità di elettricità. L'adozione di due sistemi differenti di unità era inevitabile fino a quando il magnetismo fu sottoposto ai principi dell'elettricità. Ma questo modo di procedere non ebbe esito felice, anzi, accrebbe notevolmente le difficoltà per gli studiosi. Oggi, tutte le unità elettriche e magnetiche possono venire comprese nei termini delle quantità elettriche. Il volt, l'ampère, l'ohm, il coulomb ed altre unità pratiche si mantengono invariate, ma invece di basarle su un'astrazione matematica come quella del polo magnetico, esse vengono interpretate in base all'unità naturale dell'elettricità: l'elettrone.

CAPITOLO IX.

Correnti indotte.

Fino ad ora abbiamo considerato correnti uniformi che, nei metalli, sono costituite soltanto dal movimento di elettroni aventi una velocità media costante. Questo movimento avviene in direzione opposta a quella che si attribuiva dianzi alla « corrente » e sviluppa una forza magnetica nello spazio circostante, la quale è proporzionale al momento degli elettroni.

Dobbiamo ora considerare il caso in cui gli elettroni sono messi in movimento o arrestati; in altre parole il caso delle correnti soggette a variazioni.

Ora sappiamo che tutti gli elettroni in un filo vengono incessantemente arrestati dalle collisioni cogli atomi neutri e rimessi in movimento per il campo elettrico non appena essi si liberano dagli urti successivi. Ma questi arresti e successivi avviamenti non influenzano l'azione magnetica esterna, poichè essi sono così straordinaria-

mente numerosi, e tutti i differenti stadî del procedimento si rappresentano a qualsiasi dato istante. In breve l'effetto esterno è identico a quello che risulterebbe se gli elettroni si spostassero con una velocità uniforme lungo un filo. La sola indicazione che abbiamo delle effettive collisioni è il calore sviluppato nel filo, che rappresenta l'energia di movimento che si trasforma in calore quando l'elettrone è arrestato. Ma che avviene quando tutti gli elettroni sono arrestati nello stesso istante?

Ciò che accade è molto simile a quanto si verifica quando un qualsiasi corpo viene arrestato. L'energia cinetica si trasforma in qualche altra forma di energia, ed eventualmente viene irradiata nello spazio in forma di calore o di altre onde eteree.

L'energia cinetica o energia di movimento di un corpo ponderabile è eguale alla metà del prodotto della sua massa per il quadrato della sua velocità $= \frac{1}{2}$ m v^2. Così l'energia cinetica di un gramma che muove colla velocità di 1 cm. al secondo è $\frac{1}{2}$ erg. In altre parole, arrestandolo, possiamo ottenerne il lavoro pari ad un mezzo erg. È pure richiesto $\frac{1}{2}$ erg. di lavoro per impartire ad 1 gr. la velocità di 1 cm. al secondo. Questa quantità di lavoro si effettua sempre quando noi esercitiamo la forza di una dina alla distanza di $\frac{1}{2}$ cm.

In base a questo principio calcoliamo ora

l'energia di movimento di un elettrone. La sua massa è stata calcolata in $0,61 \times 10^{-27}$ gr. (p. 25). La sua velocità non può mai eccedere quella della luce, che è di 3×10^{10} cm. al secondo. Quindi l'energia cinetica dell'elettrone non può mai essere più grande di $\frac{1}{2} \times 0,6 \times 10^{-27} \times 3^2 \times 10^{20}$, ossia: $2,7 \times 10^{-7}$ erg. Parimenti l'energia cinetica di una « compagnia » (cioè di un'unità elettrostatica) di elettroni è sempre minore di 800 ergs. e l'energia cinetica di un coulomb o « armata di elettroni » è sempre minore di 2,38 bilioni di ergon.

La quantità di energia richiesta per impartire una data velocità a un elettrone è tuttavia influenzata dalla presenza di un campo magnetico. Che ciò debba avvenire appare evidente ricordando il principio della conservazione dell'energia. Quando un elettrone si sposta parallelamente a un filo portatore di corrente nella stessa direzione in cui muovono gli elettroni nel filo, esso viene attirato dal filo. In altre parole esso possiede un'energia di posizione (o energia potenziale) che si somma colla sua energia di movimento. Questa energia di posizione è direttamente proporzionale alla velocità dell'elettrone, poichè l'attrazione fra esso ed il filo è direttamente proporzionale a questa velocità. Essa è ancora proporzionale al momento degli elettroni nel filo; in altre parole, al campo magnetico generato dagli stessi.

È quindi più difficile incamminare un elettrone

nella stessa direzione di altri elettroni già in movimento, che di avviarlo in uno spazio vuoto. Si richiede più energia e maggior consumo di lavoro. L'eccesso è direttamente proporzionale al campo magnetico creato dagli elettroni nel filo o semplicemente al campo magnetico *in qualsiasi modo esso si origini*.

Il compenso può venire effettuato coll'impartire una quantità *extra* di momento all'elettrone in proporzione al campo magnetico. Questo momento può venire impartito ad esso mediante una forza esterna agente su di esso per un tempo determinato.

Ora, una forza agente per un tempo determinato produce ciò che dicesi un « impulso ». Una forza di una dina agente per lo spazio di un secondo produce un impulso di una dina-secondo. Se agisce su un grammo produce in esso una velocità di $\frac{1}{1000}$ cm. per secondo. Se agisce sopra un milligrammo essa gli imparte la velocità di 10 m. al secondo. In ogni caso lo stesso impulso produce lo stesso momento.

Per avviare quindi un elettrone attraverso un campo magnetico è necessario fornirgli un impulso *extra*, proporzionale alla forza del campo magnetico. Ora se l'elettrone è già in movimento ed una corrente viene lanciata improvvisamente in un filo vicino, un campo magnetico verrà suscitato intorno all'elettrone. Se non riceve l'*extra*-impulso necessario, l'impulso stesso dovrà venire sottratto dalla sua velocità: i debiti vogliono essere in qualche modo soddisfatti.

Se, invece di un solo elettrone, vi è una folla di essi che si spostano lungo un filo, lo stato delle cose rimarrà invariato. Quando si pone in azione il campo magnetico essi ricevono tutti una scossa e la loro velocità si riduce di una determinata quantità proporzionale al campo magnetico.

Se il campo magnetico viene rovesciato, l'impulso è parimenti invertito e invece di un ritardo gli elettroni subiscono un'accelerazione di eguale entità. In entrambi i casi l'impulso si verifica in direzione opposta a quella che ha la corrente nel filo, ed è proporzionale alla corrente stessa.

Questo è il principio dell'induzione elettro-magnetica o della produzione di correnti mediante variazioni suscitate in altre correnti.

I fenomeni fondamentali delle correnti indotte furono scoperti dal Faraday e da lui formulate in base alla nomenclatura delle « linee di forza ». Ho fino ad ora evitato l'uso di tale denominazione allo scopo di concentrare l'attenzione del lettore sui fatti che avvengono entro ai fili conduttori. D'ora innanzi la adotterò, ma colle restrizioni e le riserve imposte dalla nuova teoria atomica dell'elettricità.

Se un foglio di carta viene disposto sopra una sbarra magnetica e cosparso di limatura di ferro, questa si dispone lungo linee curve che rappresentano approssimativamente la direzione in cui un polo magnetico libero si sposterebbe se fosse posto nel campo magnetico. Queste linee

sono dette « linee di forza », perchè la tangente in ogni punto di una delle curve rappresenta la direzione in cui la forza magnetica risultante spingerebbe il polo magnetico libero.

Ora Faraday immaginò che tutto lo spazio circostante ad un magnete sia pieno di linee invisibili corrispondenti nella direzione a queste linee segnate dalla limatura di ferro. A queste linee eteree egli attribuì un'esistenza fisica reale e delle proprietà fisiche come lo sviluppo di una forza di tensione lungo le stesse e di una pressione ad angolo retto con le stesse. Egli fu quindi condotto a « spiegare » una quantità di fenomeni magnetici, o, meglio, a riassumerli, in base alla sua fondamentale ipotesi di linee fisiche di forza.

Non si può negare che l'idea delle linee di forza è stata di una grande utilità pratica. Essa ha reso possibile agli ingegneri di rappresentare i fatti che accadono in un campo magnetico.

Per opera di Maxwell e del suo valente successore a Cambridge, il sistema delle linee e dei tubi di forza venne applicato con notevole successo alla descrizione ed alla misurazione dei fenomeni magnetici; ma fino ad ora tutti i tentativi rivolti a dimostrarne l'esistenza reale andarono falliti. Il fatto stesso che un campo magnetico unitario può venire *arbitrariamente definito* come comprendente un certo numero di linee per ogni centimetro quadrato implica la non esistenza reale di queste linee.

Si dubita appena che in un magnete perma-

nente le correnti molecolari siano per lo più disposte in file col loro asse su una stessa linea, risultandone per tal modo dei filamenti magnetici o solenoidi elementari. Questi, in ogni caso, esistono realmente, e sono in numero di 10^{16} per ogni cm^2 di sezione trasversale, questo numero misurando l'intensità della magnetizzazione.

Le linee di forza che si suppone continuino anche fuori del magnete possono venire usufruite per misurare la forza magnetica in qualsiasi punto esterno. Essa è semplicemente eguale al numero di linee verticali che tagliano l'unità di superficie in quel punto determinato. Un polo magnetico unitario viene definito come un polo emettente 4π linee di forza, cosicchè una sola linea passa attraverso ogni cm^2 di una sfera di raggio eguale a 1 cm. descritta intorno ad esso. Questa definizione mostra subito il carattere puramente arbitrario della fatta ipotesi; ma ci rende possibile stabilire la legge dell'induzione elettromagnetica in un modo più proprio, come segue:

L'impulso dell'induzione elettro-magnetica prodotto dalla creazione o dalla distruzione di un campo magnetico è ad angolo retto colle linee di forza ed è proporzionale alla differenza di densità.

Non ha alcuna influenza il fatto che il campo magnetico venga fatto variare o spostando il filo portatore della corrente, modificando la corrente, o spostando un magnete permanente. L'impulso dell'induzione è proporzionale alla mutazione avvenuta nel campo, cioè al cambiamento di densità e direzione delle linee di forza.

I casi più semplici sono quelli in cui il campo magnetico è uniforme. Abbiamo veduto sopra che il campo in un solenoide di una certa lunghezza è eguale a $4\pi n i$ unità, dove i è la corrente percorrente il filo e n il numero di giri per ogni centimetro. Questo campo è pressochè eguale in tutto l'interno del solenoide ed è indipendente dal diametro dello stesso.

Adopreremo quindi un grande solenoide avente 10 cm. di diametro, e dieci giri per ogni centimetro di lunghezza, portante la corrente di 1 ampère ed avente la lunghezza totale di 1 m. La forza magnetica nel suo interno sarà di $4\pi \times 10 \times 1$, poichè 10 ampères sono appunto l'unità di corrente elettro-magnetica. La forza magnetica nell'interno sarà cioè di 126 unità, ossia di circa 600 volte la forza magnetica orizzontale della terra nelle nostre latitudini. Esprimendoci colla nomenclatura delle « linee di forza », vi saranno 126 linee di forza attraversanti ogni cm^2 trasversale all'asse del solenoide. Il numero totale delle linee di forza che attraversano il solenoide sarà di $126 \times$ la sua area. Il raggio essendo di 5 cm., l'area è di 25π, ossia 78,4 cm^2. Quindi il numero totale delle « linee » passanti nel suo interno ammonta a 9880.

Collochiamo entro al solenoide un piccolo circolo di filo conduttore di raggio eguale a 1 cm., il cui piano sia ad angolo retto coll'asse del solenoide. La sua area sarà di 3,1416 cm^2 e il numero delle linee di forza che lo attraversano sarà di $3{,}1416 \times 126 = 396$.

Se la corrente nel solenoide viene interrotta, il suo campo magnetico è soppresso. Gli elettroni nel circolo di ferro di cui sopra sono sottoposti a una forza che tende a farli circolare nella stessa direzione della corrente precedente che percorreva il solenoide, appunto come se parte del momento degli elettroni nel solenoide fosse stato trasferito a quelli del circolo. Ora il rapporto della trasmissione di questo momento varierà, naturalmente, in ragione della soppressione della corrente originaria, cioè in ragione del cambiamento avvenuto nel campo magnetico. L'ammontare di momento che viene trasferito varia col variare della estensione, per cui il campo magnetico creato dal solenoide risulta coperto. Se le cose fossero invertite e il circolo portasse la corrente originaria, il solenoide riceverebbe l'intero suo momento elettrico non appena venisse interrotta la corrente. Ma, stando le cose come abbiamo detto sopra, il circolo interno riceverà soltanto una porzione proporzionale alla sua area ed il rapporto in cui esso riceve la corrente è la misura della forza elettromotrice *indotta* nel circolo.

Siamo giunti per tal modo ai seguenti principî importanti:

1° La FEM indotta è proporzionale alla mutazione avvenuta nel campo magnetico;

2° In un campo uniforme la FEM indotta è proporzionale all'area del circuito in cui essa viene indotta.

La concezione di Faraday delle « linee di

forza » ci rende possibile raggruppare questi due principî in un'unica regola che si esprime come segue:

La FEM indotta in un circuito dal cambiamento avvenuto nell'intensità di un campo magnetico è proporzionale al numero di linee di forza che vengono aggiunte alla sua superficie o ritirate dalla stessa, nell'unità di tempo.

Così la messa in azione o la soppressione delle 396 linee di forza che attraversano l'area del circolo nello spazio di un secondo indurranno nel circolo una FEM di 396 unità. Occorre notare che queste unità non sono volts o unità pratiche, ma le unità elettromagnetiche di 10^{-8} volts. La FEM sarà quindi molto debole, ma essa può venire intensificata accorciando il tempo durante il quale si produce il cambiamento nel campo magnetico. Se la corrente fosse interrotta per un milionesimo di secondo, la FEM sarebbe di 3,96 volts. Se invece di un circolo di filo conduttore si adoperasse un breve avvolgimento comprendente 10 giri, la forza elettromotrice sarebbe di 39,6 volts.

La *corrente* che percorre il circolo di ferro non dipende soltanto dalla FEM indotta, ma anche dalla resistenza del filo. Se la FEM indotta è di 3,96 volts e la resistenza di 0,001 di ohm, la forza della corrente sarà di 3960 ampères. Ma questa corrente durerà solo fino a quando durerà la FEM, cioè per un milionesimo di secondo. Quindi la *quantità di elettricità* che attraversa ciascuna sezione del circolo di filo di ferro

non è di 3960 coulombs, ma di 0,00396 coulombs. Questa quantità è affatto indipendente dall'entità del cambiamento avvenuto nel campo magnetico. Abbiamo quindi la regola semplice: La quantità di elettricità che attraversa una sezione qualsiasi del conduttore è proporzionale al cambiamento nel numero delle linee magnetiche di forza che passano attraverso l'area del circuito.

Il « numero di linee di forza che attraversa un'area » dicesi il « flusso magnetico » che attraversa quell'area. Ne consegue che la quantità di elettricità che passa nella stessa superficie è misurata dal cambiamento che avviene nel flusso magnetico che percorre il circuito. Fino a che il flusso magnetico è soggetto a mutamento l'elettricità continua a percorrere il circuito e la sua velocità dipende dal rapporto di cambiamento della forza magnetica. La sua direzione è determinata dalla direzione del campo magnetico.

La direzione del campo magnetico è determinata in relazione colla terra. Il nostro pianeta forma di per sè un magnete e offre un polo magnetico Nord e un polo magnetico Sud. Tutti i magneti permanenti hanno quindi due poli e la diversa nomenclatura adottata per essi ha dato luogo a non pochi inconvenienti. Quando si constatò che poli dissimili si attirano, si trovò assai logico di chiamare polo sud dell'ago magnetico la estremità di esso che si volge verso il nord e polo nord l'estremità opposta. Ma l'uso comune adottò in pratica la nomenclatura opposta, chia-

mando polo nord quello che è rivolto al nord e viceversa. In Europa questa nomenclatura è ancora oggidì adottata nella pratica. Il modo migliore per sciogliere ogni difficoltà parmi sia quello suggerito da Silvano Thomson, che chiama estremità nord dell'ago quella che guarda il polo nord e estremità sud dell'ago quella che guarda il polo sud. Questo sistema è chiaro e preciso. Tutte queste ambiguità si evitano però naturalmente riferendo queste definizioni al movimento degli elettroni. Se una coppia di zinco e rame viene immersa in acido solforico diluito ed il reoforo che li unisce è avvolto a spire, questo avvolgimento si dispone col suo piano in direzione ad angolo retto col meridiano magnetico, in modo tale che lo zinco sia rivolto verso l'est e il rame verso l'ovest. Ciò significa che gli elettroni nella parte superiore del reoforo fluiscono nella direzione del moto del sole nel cielo, mentre invece nella metà inferiore dell'avvolgimento essi procedono da ovest verso est. Quindi alla superficie della terra la corrente degli elettroni fluisce dall'ovest all'est, ossia in opposizione al movimento apparente del sole. In realtà tale corrente segue il moto di rivoluzione della terra. Ora è stato verificato che la semplice rotazione di una sfera, carica negativamente, intorno al suo asse genera alla sua superficie un campo magnetico; si potrebbe supporre che la causa del magnetismo terrestre sia la stessa; però un semplice calcolo, basato sull'alto potenziale elettrico della terra, dimostra che il movimento della

terra può originare soltanto una decimillesima parte del campo magnetico effettivo. Tale campo magnetico pare dovuto in parte alle scariche che si producono negli e dagli spazi interstellari e in parte a effetti termoelettrici. È noto che, se si riscalda un punto di un filo di ferro in modo che la diminuzione di temperatura sia più rapida da una parte che dall'altra, si produce una corrente di elettroni che va dalla porzione in cui questa diminuzione è più rapida all'altra porzione. Ora questa depressione graduale di temperatura si verifica anche nel caso della terra. L'aumento di temperatura nelle ore del mattino è più rapido della diminuzione nelle ore della sera. Il punto di massima temperatura trovasi in corrispondenza di un meridiano a 30° est della posizione del sole, ed a partire da questo punto si verifica un aumento graduale nella direzione ovest ed una diminuzione graduale meno rapida verso l'est. Se la terra si comportasse come il ferro, sotto questo aspetto — e il ferro forma uno dei principali costituenti, non solo della terra, ma anche di altri corpi celesti — una corrente di elettroni dovrebbe dirigersi dall'ovest all'est. Ciò spiegherebbe la parte più grande del magnetismo della terra; ma, naturalmente, nessuno potrà affermare di aver così trovato l'esatta spiegazione del magnetismo terrestre fino a quando non sia dato verificarla in base a qualche dato numerico. In ogni caso è sempre utile ricordare che la corrente degli elettroni intorno alla terra si di-

rige dall'ovest all'est, contro alla direzione del movimento rispetto al sole (fig. 27).

In un ago magnetico, M, la corrente degli elettroni è diretta in modo tale che dalla parte di esso più vicina al suolo, gli elettroni viaggiano in direzione eguale a quella degli elettroni

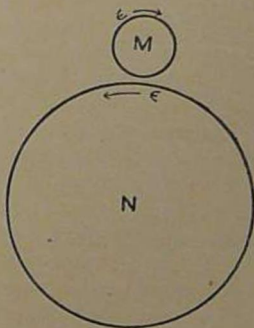



Fig. 27.

della terra. Quindi, sempre quando il polo che guarda il nord in un ago magnetico è rivolto verso di noi, sappiamo che la corrente degli elettroni procede intorno ad esso nella direzione delle lancette di un orologio. E quando l'estremità di un solenoide è rivolta verso di noi e la corrente degli elettroni che va dallo zinco al rame lo avvolge, noi sappiamo che il solenoide, se è appeso o galleggi libero di spostarsi in ogni

direzione, si disporrà con questo estremo verso il nord. Un solenoide più piccolo collocato nel suo interno, accoglierà una corrente indotta nella stessa direzione quando la corrente principale viene interrotta ed una corrente in direzione opposta quando la corrente principale viene riattivata.

Poichè la corrente degli elettroni in un filo comprende un grandissimo numero di elettroni in movimento, essa può venire considerata come l'aggruppamento di innumerevoli conduttori di diametro piccolissimo, ed è evidente che questi conduttori si influenzeranno a vicenda. Sarà quindi più difficile iniziare una corrente nell'interno di un filo spesso che non di iniziare la stessa corrente suddivisa in una quantità corrispondente di fili più sottili presi separatamente. Il fenomeno per il quale una corrente che percorre un filo impedisce per azione propria un aumento od una diminuzione, dicesi « auto-induzione » o, brevemente, « induttività », ed è numericamente eguale al flusso magnetico che percorre il circuito quando questo accoglie l'unità di corrente. In un lungo solenoide a asse rettilineo percorso dall'unità di corrente (10 ampères) la forza magnetica è eguale a $4\pi n$, in cui n è il numero dei giri per ogni unità di lunghezza. Se A è l'area della sezione, il numero delle linee di forza che passano per ogni giro è di $4\pi n$A; e siccome ogni unità di lunghezza contiene n giri del filo, il numero delle linee di forza sarà di $4\pi n^2$A, cosicchè l'induttività di un solenoide

di lunghezza l sarà $4\pi n^2 l A$, cioè eguale al doppio dell'energia del campo magnetico, dovuta all'unità di corrente.

L'induttività può venire accresciuta in modo straordinario introducendo un' anima di ferro entro al solenoide, poichè in tal caso le linee di forza dovute alle correnti molecolari, si sommano con quelle del solenoide.

CAPITOLO X.

Radiazioni.

Abbiamo fino ad ora considerato le azioni elettriche senza tener conto del tempo impiegato a trasmetterle da un luogo all'altro. Ci siamo occupati di queste azioni come ci occupiamo di quelle prodotte dalla forza di gravitazione. Ora è noto dalle osservazioni astronomiche che la forza di gravitazione si trasmette nello spazio con una velocità infinita, velocità tanto grande che non possiamo scoprire alcun intervallo di tempo frapposto tra il sorgere di una data configurazione delle masse soggette alla gravitazione e l'azione di questa forza come definita nelle leggi di Newton. Se, ad esempio, la forza di gravitazione venisse trasmessa nello spazio colla velocità della luce, si produrrebbe un certo ritardo o dilazione dell'azione della forza fra due corpi celesti in rapporto alla posizione reciproca. Così se un corpo cadesse sul sole attraversando

l'orbita della terra, la forza esercitata su di esso dal sole in ogni singolo istante non sarebbe dovuta alla sua posizione rispetto al sole in quel dato istante, bensì alla posizione che il corpo stesso occupava otto minuti prima di quell'istante, poichè la forza di gravità impiegherebbe otto minuti ad attraversare la distanza che separa il sole dall'orbita terrestre. Questo ritardo sconvolgerebbe tutti i calcoli basati sulle leggi di Newton sull'attrazione universale, e sarebbe stato senza dubbio constatato.

Si pensò per molto tempo che le forze elettriche e magnetiche si propagassero istantaneamente per spazi suscettibili di osservazione, o, per lo meno, colla stessa velocità di propagazione della forza di gravità. In tal caso un campo magnetico prodotto mediante l'eccitazione di un elettromagnete, non appena in azione nei nostri laboratori, dovrebbe estendere la sua influenza fino al sole ed alle altre stelle fisse. Parimenti, se noi potessimo istantaneamente creare o distruggere una massa di materia, si verificherebbe istantaneamente un aumento o una diminuzione nella somma di gravitazione, per tutto l'universo.

Se un campo magnetico venisse fatto oscillare fra un valore massimo ed uno minimo, la sua influenza in qualsiasi punto esterno dovrebbe variare in proporzione eguale; ma la distanza fra due successivi *massimi* d'influenza dipende dal rapporto della sua propagazione. Con una velocità infinita la « lunghezza di onda » o distanza fra due massimi successivi sarebbe infinita.

Se avessimo un mezzo per creare o distruggere la materia, noi potremmo produrre delle onde di forza di gravitazione, aventi una lunghezza d'onda infinita. Ma l'ottica ci ha reso familiare una velocità di propagazione che, quantunque molto grande, è tuttavia suscettibile di misurazione. Essa è la velocità della luce, eguale a 3×10^{10} cm. al secondo, ossia 186.000 miglia inglesi al secondo, e gli esperimenti di Hertz hanno dimostrato che un campo magnetico si propaga all'esterno appunto con questa velocità. Ciò significa che quando un magnete è successivamente attivato e soppresso, delle onde di forza magnetica vengono lanciate nello spazio, aventi una lunghezza d'onda proporzionale al tempo frapposto fra due riattivamenti e interruzioni successivi. Se si produce un'interruzione ogni otto minuti, la lunghezza d'onda è eguale alla distanza della terra dal sole. Se l'interruzione avviene un milione di volte al secondo, la lunghezza d'onda è circa un sesto di un miglio.

Vi è quindi una stretta analogia fra la propagazione della luce e la propagazione della forza magnetica. Entrambi questi procedimenti possono venire classificati sotto il nome di « radiazioni », definite come il procedimento per cui un turbamento viene propagato nello spazio senza l'intervento di materia ponderabile. I raggi luminosi, i raggi termici e i raggi di forza magnetica possono venire compresi in questa categoria. Non così i raggi catodici, i quali risultano semplicemente di elettroni proiettati, nè i raggi canali che risultano di atomi positivi proiettati.

Abbiamo trattato nel capitolo precedente di tre azioni elettriche agenti a distanza: 1° Forza elettrostatica, ossia la forza che si esercita fra corpi carichi allo stato di riposo; 2° Forza magnetica, ossia la forza che si esercita fra corpi carichi in moto uniforme; 3° Forza d'induzione, ossia la forza che agisce fra corpi carichi soggetti a moto accelerato.

La seconda e la terza delle citate forze non si esplicano se non quando le cariche elettriche, cioè gli elettroni o gli atomi positivi, sono in movimento. Poichè tale movimento può essere suscitato a volontà, possiamo determinare la velocità di propagazione di queste forze coi metodi impiegati nel determinare la velocità di propagazione della luce, senza l'aiuto dei corpi celesti, o con metodi analoghi. Ma non possiamo creare nè distruggere una scarica elettrica. La elettricità non è una specie del movimento, essa è cosa indistruttibile al pari della materia, non possiamo quindi determinare la velocità di propagazione della forza elettrostatica con esperimenti limitati alla terra. Se noi conoscessimo il valore preciso delle cariche elettriche dei pianeti, vi sarebbe almeno una debole probabilità di scoprire un rapporto finito per la propagazione della forza elettrostatica fra essi; ma abbiamo veduto sopra (p. 76) che questa forza è insignificante, paragonata colla forza di gravitazione agente fra i corpi celesti.

Non possiamo quindi dare alcun valore alla velocità di propagazione della forza elettrosta-

tica. Può darsi che sia un valore infinito come quello che si riferisce all'altra forza statica, la gravitazione; e che noi siamo nel vero parlando di raggi e onde elettrostatiche come parlando di raggi e onde della forza di gravitazione.

Ma la velocità di propagazione delle forze dinamiche 2ª e 3ª è nota. Queste forze si propagano infatti nello spazio colla velocità della luce, e se interviene una materia qualsiasi contenente elettroni liberi o atomi positivi, la loro velocità di propagazione è diminuita appunto come diminuisce la velocità della luce in circostanze simili.

Consideriamo due fili conduttori paralleli aventi una lunghezza infinita, lungo i quali gli elettroni si spostino nella stessa direzione. Fra i due fili agisce una forza di attrazione che rimane costante fino a che le correnti rimangono immutate. Non si sviluppa fra essi alcuna forza elettrostatica nè alcuna forza d'induzione. La forza magnetica essendo uniforme, non vi sono onde nè radiazioni magnetiche. Se però facciamo diminuire uniformemente fino a zero la corrente in uno dei due fili, che chiameremo A, il campo magnetico diminuirà anche uniformemente fino a zero, e la forza magnetica agente fra i due fili si annullerà. La forza magnetica ha per condizione essenziale al suo sviluppo l'esistenza di due campi magnetici, dovuti a correnti di elettroni.

Quando la corrente in A è ridotta a zero, il campo magnetico A si annulla istantaneamente

nel filo stesso, ma impiega un certo tempo a annullarsi nelle regioni alquanto lontane dal filo.

Così in B esso si annulla dopo un intervallo di tempo che è in relazione colla distanza tra A e B. Se questa distanza fosse di 186.000 miglia, la forza magnetica in B perdurerebbe per lo spazio di un secondo dopo che la corrente in A ha cessato di fluire. La diminuzione della forza magnetica in A produce quindi una diffusione di smagnetizzazione che si estende per uno spazio infinito, colla velocità della luce. Questa diffusione è accompagnata da una diffusione di forza induttiva. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, un ritardo od un'accelerazione di elettroni percorrenti un filo produce uno spostamento in direzione inversa in un filo vicino, lo spostamento degli elettroni attraverso una sezione qualsiasi del filo essendo proporzionale al cambiamento nella intensità del campo magnetico. In B si ha quindi la produzione di due effetti diversi quando la corrente in A diminuisce fino allo zero:

a) La forza magnetica fra A e B diminuisce col diminuire della corrente in A;

b) Gli elettroni in B sono soggetti ad una accelerazione induttiva nella direzione della corrente principale durante il progredire della diminuzione di corrente in A.

In *a)* abbiamo quindi una diminuzione uniforme di una forza agente lungo la linea che congiunge A e B. In *b)* abbiamo una forza uniforme che agisce ad angolo retto con la linea che congiunge A e B, forza che dura fino a che la corrente

in A è soggetta a cambiamento. Le forze *a)* e *b)* sono nel piano dei due fili, ma formano fra loro un angolo retto.

Ora, la forza *a)* è una forza « magnetica », che secondo i metodi antichi, veniva misurata come la forza agente in un « polo » magnetico. Ma le linee magnetiche di forza si suppongono corrispondere alle linee lungo le quali il « polo magnetico libero » si sposterebbe. In realtà non esistono poli magnetici liberi, e se anche esistessero essi girerebbero sempre intorno ad un filo percorso da corrente. Le linee magnetiche di forza intersecheranno quindi il piano che contiene i fili A e B, formando angoli retti. Si dice quindi comunemente che la forza magnetica è sempre ad angoli retti colla forza « elettrica » (induttiva) e che entrambe sono situate nel piano della fronte dell'onda, cioè nel piano normale alla direzione della propagazione. Poichè nella moderna teoria tutte le forze magnetiche si risolvono in forze di elettroni in movimento, la forza magnetica agisce nella direzione di propagazione dell'onda. Essa è una forza « longitudinale » mentre la forza induttiva è una forza « trasversale », e solo quest'ultima è collocata nel piano della fronte dell'onda.

Queste considerazioni ci guidano alla importante concezione di un'*onda elettro-magnetica*. Poichè nessun'onda magnetica può venire creata senza che avvenga cambiamento nella forza magnetica il quale provoca una induzione, e poichè non vi è induzione possibile senza elettroni in

movimento e, quindi, senza campi magnetici, in tutte le onde elettro-magnetiche noi abbiamo due forze, la forza magnetica e la forza d'induzione che procedono di pari passo e sono sempre ad angolo retto fra loro.

Sono queste onde elettro-magnetiche quelle che vengono utilizzate nella telegrafia senza fili, e sono queste stesse onde che producono, quando hanno una lunghezza d'onda assai minore, tutti i fenomeni luminosi.

Consideriamo un elettrone isolato che si sposti rapidamente avanti e indietro lungo un cammino verticale di un centimetro di lunghezza, e supponiamo che il suo movimento sia periodico come quello dell'asta di un pistone; la sua velocità sarà massima nella metà della sua corsa e minima alle estremità. Il campo magnetico dovuto al suo movimento sarà quindi massimo quando l'elettrone percorre la parte centrale del suo cammino e minimo quando il suo movimento viene invertito. D'altra parte, l'accelerazione (o il ritardo) sarà massima agli estremi del percorso e la forza induttiva dovuta all'elettrone sarà massima quando la direzione del suo cammino si inverte. L'elettrone emette quindi due sistemi di onde nello spazio circostante, onde che si propagano colla velocità della luce, ma in relazione reciproca tale che il massimo per le onde di un sistema corrisponde ad un minimo nell'altro sistema di onde.

Un elettrone isolato non potrebbe, com'è ovvio, dare origine ad un effetto elettro-magnetico ap-

prezzabile; ma delle onde magnetiche percettibili possono essere sviluppate da un rocchetto di induzione scaricato attraverso un conduttore di una certa capacità.

Possiamo provocare la scarica di un rocchetto d'induzione attraverso a due sferine metalliche (fig. 28) collegate a lastrine pure metalliche per aumentarne la capacità. Questa scarica è naturalmente oscillatoria, poichè la corrente primaria nel rocchetto è attivata e interrotta con rapida successione. Scarica oscillatoria significa la saltuaria produzione degli elettroni. Il numero di oscillazioni al secondo è stato determinato osservando in uno specchio la scintilla. Trowbridge e Duane constatarono un numero di oscillazioni di cinque milioni al secondo con piccola capacità. Esperimentando con una capacità maggiore le oscillazioni sarebbero più lente (1).

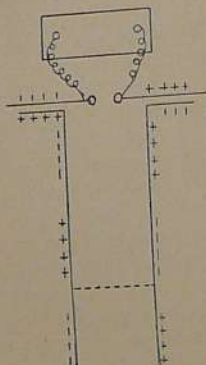



Fig. 28.

(1) Il periodo dell'oscillazione è dato dall'equazione $T = 2\pi \sqrt{LC}$, in cui L è l'auto-induzione e C la capacità del circuito.

Le oscillazioni possono essere osservate più facilmente collocando due lastre metalliche di fronte a quelle attaccate alle sferine e unendo ad esse due fili paralleli con estremità libere, come mostrato nella figura. Questa disposizione è dovuta a Lecher, ed è un perfezionamento introdotto nell'apparecchio con cui Hertz riuscì a dimostrare l'esistenza di onde elettriche.

Il prodursi degli elettroni nello spazio interposto fra le due sfere provoca una induzione nelle piastre secondarie eccitando un movimento degli elettroni all'unisono (benchè sempre in direzione opposta) coll'accelerazione degli elettroni nello spazio suddetto. Queste influenze si verificano pure nei fili conduttori provocando in essi parimenti la corsa degli elettroni, appunto come avviene per i circoli descritti dalle particelle d'acqua quando viene un'ondata.

Quando l'eccitazione o la produzione di elettroni raggiunge l'estremità del filo, essi si accumulano in quel punto per rimbalzare poi, appunto come fanno le onde, frangendosi contro la riva del mare. L'analogia colle onde d'acqua è ancora più pronunciata. Infatti, quando un'onda d'acqua si frange contro una scogliera e ne è respinta, essa si combina coll'onda successiva formando un'onda stazionaria e l'acqua si solleva e si abbassa nello stesso luogo, come una corda di violino. Parimenti, le correnti diretta e riflessa degli elettroni si combinano formando in un filo delle onde stazionarie separate fra loro dai « nodi » in cui non esiste alcun accumulo di elettroni, ma

un movimento assai rapido in entrambe le direzioni. Questi nodi e i « ventri » che li congiungono sono fenomeni assai noti nelle vibrazioni eccitate nelle corde o nelle asticine elastiche. La distanza che separa due nodi successivi è eguale alla metà della lunghezza d'onda dell'impulso elettrico. Se nel filo si trovano degli intervalli in cui può prodursi la scintilla, i nodi sono caratterizzati dall'assenza di scintille, e il centro dei ventri da un massimo nella produzione di esse. Ma un rivelatore più sensibile per queste onde è formato da un tubo di vetro in cui venne fatto il vuoto colla più grande approssimazione, che s'illumina quando è collocato in un ventre e rimane oscuro quando è invece disposto in un nodo. Se si aggiunge un semplice filo conduttore fra le interruzioni, il tubo cessa generalmente di rispondere all'eccitamento, perchè tutte le oscillazioni ne risultano turbate. Ma se questo filo viene disposto fra due nodi il tubo si illumina in un punto corrispondente ad un ventre e non si spegne neanche quando tutti gli altri nodi fossero congiunti fra loro. In questo modo si può indicare graficamente il sistema delle onde e si può determinare sperimentalmente la lunghezza d'onda. In un esperimento in cui la frequenza era di cinque milioni al secondo, la lunghezza d'onda si trovò essere eguale a 57 metri. Quindi la velocità di propagazione era di $5 \times 10^6 \times 5700$ cm. al secondo, ossia, approssimativamente di 3×10^{10} cm. al secondo. Questa è la velocità della luce, ed abbiamo

quindi la prova sperimentale che le *onde elettriche si propagano lungo un filo colla velocità della luce*.

Hertz, facendo riflettere delle onde nell'aria da una lastrina metallica, dimostrò parimenti che le onde elettro-magnetiche si propagano nell'aria con la stessa velocità. Egli diede per tal modo una brillante conferma sperimentale della supposizione di Maxwell: che la luce stessa è un fenomeno elettro-magnetico e consiste di onde elettro-magnetiche aventi una lunghezza d'onda assai ridotta.

La frequenza della scarica di un condensatore è molto grande, le oscillazioni raggiungendo il valore di milioni al secondo. Tuttavia non è sufficiente a produrre onde così brevi come le onde luminose. Lebedew, diminuendo la capacità e l'induttività del sistema produttore delle onde, riuscì a ridurre la lunghezza d'onda a un mezzo centimetro. Ma poichè la lunghezza d'onda della luce gialla è così piccola che occorrono 20.000 onde di essa per formare un centimetro, è evidente che i nostri sistemi di oscillazione devono raggiungere una rapidità assai più grande prima che si riesca a produrre luce direttamente dal movimento di cariche elettriche.

Se però ricordiamo che le oscillazioni degli elettroni intorno agli atomi positivi avvengono colla frequenza di 10^{15} vibrazioni al secondo, a un dipresso, i fenomeni luminosi trovano una spiegazione molto semplice. Infatti, ciascun elettrone nel compiere il suo percorso in linea retta

o ellittica, emette onde di forza magnetica e di induzione, e ciascun elettrone che percorre una linea circolare dà origine a un campo magnetico uniforme, ed a un campo ruotante di forza induttiva.

Abbiamo considerato sopra l'oscillazione di un elettrone da cui partono necessariamente delle onde di forza magnetica o d'induzione, le quali, quando raggiungono certe dimensioni, devono apparire visibili ai nostri occhi in forma di luce. Se queste onde hanno una lunghezza troppo grande, esse costituiscono onde di luce infra-rossa o onde termiche; se sono troppo corte costituiscono raggi ultra-violetti che sono potentemente attinici. Quando, invece di oscillare lungo una linea retta, l'elettrone descrive un'orbita ellittica, cambia il suo rapporto di velocità e di accelerazione in relazione al suo centro di forza nell'atomo positivo; ma quando descrive un circolo la sua velocità è costante. Esso è soggetto a un'accelerazione costante verso il centro del circolo, e quest'accelerazione sviluppa una forza d'induzione, quantunque sia impotente a far variare la velocità con cui l'elettrone compie le sue rivoluzioni. La direzione dell'accelerazione varia continuamente, in realtà circolarmente, e quindi anche la forza induttiva gira. L'onda che viene lanciata nello spazio serpeggia in modo simile a quello di una fune posata su un tavolo, che venga rapidamente fatta girare fra le dita a una estremità. Se quest'onda è visibile in forma di luce, essa viene qualificata in ottica come « circo-

larmente polarizzata », in una direzione che dipende dalla direzione del movimento di rivoluzione dell'elettrone.

Se l'elettrone non fa che oscillare qua e là, almeno pare che così faccia dal punto di vista (così come pare faccia un elettrone quando è veduto da una sola parte), si dice che la luce è « piano-polarizzata ». Ma il piano di polarizzazione in cui l'elettrone oscilla è ad angolo retto con esso. Infatti, quando un'onda elettro-magnetica viene intercettata da un vetro disposto secondo un angolo, detto « angolo polarizzante », l'onda viene riflessa solo quando l'oscillazione elettrica avviene in un piano normale al piano d'incidenza. Questo esperimento dirime l'antica controversia riguardante il movimento reale relativamente al piano di polarizzazione.

Quando un altro elettrone che sta effettuando la sua rivoluzione incontra un'onda polarizzata circolarmente — un mulinello, come descritto sopra — la sua rivoluzione viene ritardata o accelerata. Se entrambi girano nella stessa direzione la rivoluzione del secondo elettrone è ritardata dall'impulso induttivo che avviene sempre, come abbiamo veduto, in direzione opposta al movimento della carica da cui la forza induttiva procede. Per lo stesso motivo, il movimento di un elettrone che gira in direzione opposta alla direzione dell'elettrone radiante, viene accelerato.

Se gli elettroni così spinti non girano in piani normali alla direzione di propagazione dell'im-

pulso, l'accelerazione o il ritardo sarà ridotto in proporzione alla proiezione della loro orbita sul piano normale. Ma noi vediamo che in ogni caso, siano gli elettroni accelerati o ritardati nel loro movimento, l'effetto risultante dell'impulso è quello di contrastare il campo magnetico che emette l'impulso. Ciò avviene anche quando un circuito induce una corrente in un altro circuito. In questo caso si deve notare una differenza importante. In un filo l'impulso d'induzione si disperde nel superare la resistenza del filo stesso e trasformandosi in calore. Negli elettroni che girano liberamente non vi è tale sciupìo di energia. Un campo magnetico eccitato subitaneamente induce un cambiamento permanente di velocità nel moto lungo l'orbita dei singoli elettroni, cambiamento che dura fino a che il campo magnetico sia soppresso. Questo cambiamento permanente di velocità agisce sempre in opposizione al campo che l'ha prodotto. Ora quando un corpo è magnetizzato in una direzione opposta del campo, noi lo diciamo « diamagnetico ». Siamo quindi condotti alla conclusione che tutti i corpi i quali contengono degli elettroni in movimento lungo un'orbita, attorno agli atomi, sono corpi diamagnetici. L'esperimento di Zeeman dimostra che tutti i corpi contengono di questi elettroni, e quindi *tutte le sostanze conosciute sono fondamentalmente diamagnetiche*. Ma poichè il cambiamento di velocità realmente prodotto non eccede l'uno per 100.000, esso è di regola pres-

sochè inapprezzabile; e quando i circuiti orbitali si influenzano fra loro tanto da portarsi su una stessa linea, l'effetto paramagnetico è sufficiente per mascherare completamente il diamagnetismo fondamentale della sostanza.

Le considerazioni sopra esposte spiegano come certe sostanze assorbano la luce e altre no. Quelle sostanze che contengono elettroni liberi, non collegati permanentemente ad atomi separati, permettono ai loro elettroni di seguire le forze magnetiche e d'induzione contenute nell'onda luminosa e il movimento così prodotto viene assorbito e disperso sotto forma di calore. Queste sostanze sono i buoni conduttori, specialmente i metalli. Le soluzioni i cui ioni hanno una mobilità molto più grande di quella degli elettroni contenuti nei metalli, sono assai più trasparenti di questi ultimi, e gli isolatori, specialmente quelli a bassa costante dielettrica, assorbono la luce in quantità minima. Si comprenderà anche facilmente che quando per caso gli elettroni di un corpo illuminato girano con periodo eguale a quello della luce incidente, il cambiamento di velocità è più grande che non negli altri casi. Il loro equilibrio orbitale è più facilmente turbato e gli elettroni corrono lontani dai rispettivi atomi ed errano nello spazio. Questo costituisce il fenomeno della « risuonanza ottica ». Esso spiega il fatto che delle onde luminose di una lunghezza determinata vengono assorbite assai più facilmente delle altre, spiega cioè i fenomeni dei *colori*. Questo fenomeno ci rende anche possibile comprendere

come un corpo possa assorbire più facilmente luce di colore e di lunghezza d'onda eguali a quelle che esso stesso emette, il che costituisce una legge fondamentale e importante della radiazione.

CAPITOLO XI.

Misure concernenti gli elettroni.

Nel presente capitolo io mi propongo di esporre quegli esperimenti che condussero al riconoscimento generale della teoria degli elettroni e portarono il mondo scientifico, per così dire, faccia a faccia coll'elettrone stesso. Fino ad ora abbiamo considerato l'esistenza dell'elettrone come ammessa *a priori*, e sovente il lettore avrà desiderato una qualche dimostrazione dell'esistenza di un corpo leggero più di mille volte l'atomo di idrogeno, il quale era stato ancora poco tempo addietro considerato come la più piccola particella esistente. Tale dimostrazione verrà ora esposta.

Quando in un tubo viene fatto il vuoto a rapporto di un milionesimo coll'atmosfera, i fenomeni luminosi che si produssero in esso sino a questo punto cessano per dar luogo ad altri fenomeni dovuti ai raggi catodici che provengono in linea retta dal catodo o elettrodo nega-

tivo producendo una fluorescenza verdognola sulle pareti del tubo.

Questi raggi catodici sono elettroni proiettati dal catodo con una velocità enorme.

Ciò è provato dai fatti seguenti:

a) I « raggi » trasportano una carica negativa.

b) Essi consistono di minutissime particelle di materia.

c) Queste particelle possiedono una carica costante che ammonta a $3{,}4 \times 10^{-10}$ unità elettrostatiche.

d) Le particelle hanno una massa circa mille volte minore di quella di un atomo di idrogeno.

e) Esse si spostano con velocità poco inferiore a quella della luce.

Questi fatti furono constatati a poco a poco nello svolgersi di esperimenti difficili e sovente assai ingegnosi intrapresi allo scopo di delucidare la natura dei raggi catodici. All'inizio di questa serie di esperimenti nessuno supponeva che si sarebbero trovate delle particelle catodiche identiche agli elettroni proposti dal Lorentz per spiegare il fenomeno di Zeeman. Molti sperimentatori supposero che i raggi catodici fossero onde elettro-magnetiche e credettero trovare la dimostrazione del loro assunto. Fu soltanto dopo una nuova serie di esperimenti ripetuti con successo in ogni parte del mondo, che la verità apparve manifesta a tutti. Ciò avvenne nell'anno 1897, e da quell'epoca l'elettrone è diventato

la pietra fondamentale della scienza dell'elettricità.

Che i raggi catòdici portano una carica elettrica fu dimostrato da Jean Perrin nel 1895. Il suo apparecchio è illustrato nel diagramma (fig. 29), il quale mostra un tubo vuoto provvisto di due elettrodi.

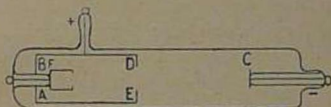



Fig. 29.

Il catodo C è un disco di alluminio e l'anodo ABDE è una scatola di alluminio provvista di un'apertura verso il catodo. Entro la scatola è collocato un cilindro cavo F collegato a un elettroscopio o a un elettrometro. Quando nel tubo sia raggiunto il vuoto in rapporto sufficiente e venga lanciata in esso una corrente, i raggi catodici vengono proiettati da C nella scatola e nel cilindro ad essa interno, il quale acquista immantinente una carica negativa. Che questa carica sia dovuta effettivamente ai raggi si prova deviando mediante un magnete il fascio irradiato dal catodo, con che F rimane scarico.

Se ora questi raggi sono formati da particelle cariche, la prima questione che si presenta è quella che riguarda la dimensione e la carica delle singole particelle e la velocità con cui esse si spostano.

Vi sono parecchi modi per determinare queste

quantità. Il procedimento che si presenta più ovvio si è quello di sottoporre a una tensione laterale le particelle. Quando dell'acqua viene proiettata da un foro orizzontale, essa descrive una parabola per l'influenza della gravità terrestre. La distanza a cui giungerà il getto dipende dalla forza con cui l'acqua viene proiettata, in altre parole, dalla sua velocità. Quanto più grande è la sua velocità, tanto meno il getto si approssimerà alla terra attraversando una data porzione del suo cammino. Ora il fascio catodico è un getto di particelle elettrizzate viaggianti con tale prodigiosa velocità che il loro peso non esercita alcuna influenza percettibile sul loro percorso. Però scopriremo facilmente delle altre forze producenti deviazioni. Poichè la velocità delle particelle è generata dal campo elettrico interposto fra l'anodo e il catodo, un altro campo agente ad angolo retto al percorso delle particelle produrrà una forte deviazione. L'apparecchio usato dal sig. J. J. Thomson per effettuare questo esperimento è quello illustrato in fig. 30. C è il catodo, A e B sono dei solidi diaframmi metallici serventi come anodo, muniti di fessure orizzontali. Il campo elettrico per la deviazione è stabilito fra le piastre D e E che sono abbastanza distaccate una dall'altra per consentire un campo assai uniforme. Il fascio catodico è ridotto in forma di stretta striscia orizzontale passando fra A e B e questa striscia si ripiega a parabola nell'attraversare il campo fra D e E, e dopo averlo abbandonato continua

in linea retta fino a che giunge ad una scala, F, che ne misura la deviazione.

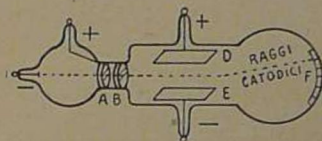



Fig. 30.

Ora l'effetto prodotto da questo campo elettrico dipende da tre fattori. Uno di essi è la velocità delle particelle di cui abbiamo parlato dianzi. Un altro è la loro carica elettrica, che controlla la forza esercitata dal campo sopra di esse. Evidentemente quanto più grande sarà la loro carica, tanto più piccola sarà la deviazione che esse subiranno. Il terzo fattore è la massa di queste particelle. Quanto più grande è la loro corsa, cioè la loro energia, tanta più forza sarà necessaria per deviarle dal loro cammino. Se e è la carica di una particella, e m la sua massa, la deviazione sarà proporzionale a $\frac{e}{m}$. Questo importantissimo rapporto è reso noto non appena si determini la velocità delle particelle. L'interesse di questo valore aumenta per il fatto che in elettrolisi il rapporto dell'elettricità trasportata alla massa trasportata è costante per ogni elemento, essendo per es. 95.000 coulombs per gramma nel caso dell'idrogeno. La scoperta di un rapporto costante simile a questo con ri-

ferenza alle scariche nei gaz fu quindi molto desiderata.

Avendo due incognite $\frac{e}{m}$ e v (la velocità), è necessario, per trovarne il valore, stabilire due equazioni indipendenti. La deviazione elettrica fornisce una delle equazioni. L'altra può venire ricavata o dalla deviazione magnetica o dalla differenza di potenziale o dal calore sviluppato.

Wiechert propose e D'Arsonval applicò un metodo molto efficace per determinare direttamente la velocità v, basandosi sulla deviazione dei raggi catodici per l'influenza di un campo magnetico. Abbiamo veduto sopra (p. 161) che un elettrone in movimento è attratto da un altro elettrone che si sposta parallelamente al primo. Se questi elettroni fossero liberi di spostarsi in qualsiasi direzione e non costretti a percorrere un filo essi si avvicinerebbero l'uno all'altro. Un filo percorso da corrente esercita una forza « magnetica » simile sugli elettroni in movimento in virtù degli elettroni che percorrono il filo stesso. La forza è diretta verso il filo, ma poichè le « linee di forza magnetica » (cioè le linee lungo le quali si sposterebbe un polo magnetico) sono circoli attorno al filo, l'attrazione esercitata sopra un elettrone in movimento è ad angoli retti colle linee di forza magnetica. Se tuttavia un tubo vuoto è disposto fra due poli magnetici, cosicchè le linee magnetiche di forza attraversano orizzontalmente il cammino dei raggi catodici, questi raggi sono deviati in su o in

giù a seconda delle polarità delle linee di forza. Quando il campo magnetico è dovuto ai poli di un elettro-magnete alimentato da una corrente alternata, il fascio catodico è deviato in su e in giù colla stessa frequenza della corrente alternata e la macchia fluorescente che esso produce sulla parete di vetro, o meglio su uno speciale schermo si sposta in su o in giù seguendo i cambiamenti di direzione della corrente. Ora, si è trovato che qualunque possa essere la frequenza di una corrente alternativa la macchia luminosa si risente immediatamente dell'alternarsi di essa. Non si può osservare nel fascio catodico alcuna ondulazione che ricordi quelle di una fune che venga scossa dal basso all'alto ad un suo estremo. Ciò dimostra intanto, senza bisogno di conferma ulteriore, che il periodo di tempo impiegato dalle particelle catodiche per giungere dal catodo alla parete deve essere infinitamente piccolo. Questo periodo di tempo può però venire misurato mediante due successivi elettromagneti disposti a qualche distanza ed accoglienti la stessa corrente ad alta frequenza. Il sig. D'Arsonval, riuscì a portare la corrente all'enorme frequenza di 10.000.000 di oscillazioni al secondo, per farla agire sui raggi. Egli dispose quindi una fessura appena oltrepassato il primo elettro-magnete così da impedire il passo a tutti i raggi catodici eccetto quelli che producono la macchia luminosa nella parte superiore dello schermo. Questi sono i raggi influenzati dal primo elettro-magnete, avente

il massimo di magnetizzazione in una direzione. Passando all'influenza del secondo elettro-magnete i raggi catodici sono di bel nuovo deviati nella stessa direzione; ma allontanando di più gli elettro-magneti e procurando che essi siano nello stesso stato magnetico in qualsiasi istante, si trova una posizione in cui il secondo elettro-magnete non produce deviazione ulteriore. Ciò avviene quando il tempo impiegato dai raggi catodici a percorrere la distanza che separa i due elettro-magneti è eguale a un quarto del periodo della corrente alternativa; infatti la corrente magnetizzante, essendo nel punto medio fra due massimi opposti, è eguale a zero. Ora questo periodo essendo di 10.000.000 esimi di un secondo, il quarto di esso è 40.000.000 esimi di secondo. D'Arsonval trovò che la distanza richiesta per questo effetto fra i due elettromagneti è di 75 cm. Quindi la velocità di propagazione dei raggi catodici o elettroni proiettati era di 75×40 milioni $=$ 3000 milioni cm. per secondo, *ossia un decimo della velocità della luce.*

Questo risultato stupefacente conduce a conclusioni altrettanto inattese. Questa velocità è un milione di volte più grande di quella del più veloce treno diretto ed un milligramma di materia che si sposti con quella velocità, ha un'energia distruttiva dieci volte superiore a quella di un treno ferroviario lanciato alla massima velocità.

Questa velocità essendo nota, il rapporto $\frac{e}{m}$ può venire determinato in base alla deviazione

elettrostatica. È però più semplice determinarla in base alla deviazione magnetica stessa. La forza magnetica agente sugli elettroni è sempre ad angolo retto col loro percorso. Questo percorso sarà quindi un arco di cerchio fino a che esso è compreso nel campo magnetico e questo campo ha una forza costante. La curvatura di questo cammino può essere calcolata in base a principî ordinari della meccanica. La forza centripeta è eguale al prodotto

$$He v,$$

in cui H è il campo magnetico ed e la carica. La forza centrifuga è

$$\frac{mv^2}{r},$$

in cui m è la massa dell'elettrone, v la sua velocità e r il raggio di curvatura. Quindi

$$Hev = \frac{mv^2}{r}$$

ossia

$$H\frac{e}{m} = \frac{v}{r}$$

e

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{Hr}.$$

Il valore ottenuto da Wiechert nel 1899 era di 465×10^{15}, il che significa che un grammo di raggi catodici rappresenta una carica di 465.000 bilioni di unità elettrostatiche o « compagnie » di elettroni.

Invece di misurare la velocità, il suo valore

può venire eliminato nelle due equazioni calcolandolo in base alla differenza di potenziale osservata, che deve impartire alle particelle una velocità dipendente unicamente dal rapporto $\frac{e}{m}$. Per tal modo Kaufmann trovò nel 1898 il valore di 558×10^{15} e Simon nel 1899, $559{,}5 \times 10^{15}$. Altri metodi, capaci di dare risultati di un'esattezza più o meno grande, furono ideati e applicati da J. J. Thomson, da Lenard, da Becquerel ed altri e tutti confermarono l'esattezza dell'ordine di valore sopra indicato.

Un'osservazione molto importante e significativa fatta da tutti questi esperimentatori fu che il rapporto $\frac{e}{m}$ non dipende dal gas contenuto nel tubo vuoto nè dalla qualità del metallo costituente gli elettrodi. Questo risultato è sorprendente se si suppone che i raggi catodici siano costituiti da atomi di materia ordinaria. Ciò significherebbe, non soltanto che la materia ordinaria è capace di viaggiare con una velocità simile a quella della luce, ma che ciascun atomo porta con sè una carica elettrica proporzionale al suo peso. Gli atomi di magnesio, zinco e cadmio, i cui pesi stanno nella proporzione di 24 : 65 : 112, trasportano quantità esattamente eguali di elettricità attraverso la cellula elettrolitica e sarebbe strano che le quantità di elettricità che essi trasportano nel tubo vuoto stessero fra loro come 24 : 65 : 112.

Ma vi è una differenza assai più notevole fra i raggi catodici e l'elettrolisi. In quest'ultima il

rapporto $\frac{e}{m}$, o la carica trasportata dall'unità di massa dell'elettrolito (o richiesta per decomporlo), varia da un metallo all'altro, m variando da un atomo all'altro mentre che e rimane costante tranne che nel caso di variazione della valenza. Per l'idrogeno, il più leggero degli elementi noti, il rapporto $\frac{e}{m}$ è $0,286 \times 10^{15}$, ossia 2000 volte più piccolo del rapporto per le particelle catodiche. Ciò significa ovvero che la massa trasportante la carica atomica è 2000 volte più grande della massa della particella catodica, ovvero che la carica dell'atomo di idrogeno è 2000 volte più piccola di quella della particella catodica.

La difficoltà di sciogliere il quesito era assai aumentata dalla resistenza a volere ammettere l'esistenza di qualche cosa di più piccolo dell'atomo di idrogeno. Tutta la tradizione della teoria atomica si ribellava dinanzi a questa idea. Ciò nondimeno il passo più importante in quest'ordine di fenomeni fu la determinazione della carica effettiva e della massa delle particelle catodiche, rimanendo così non soltanto stabilita l'esistenza di particelle materiali assai più piccole degli atomi ma l'esistenza di una forma primordiale di materia elettrica dianzi ignorata.

Il laboratorio di Cavendish a Cambridge sarà in eterno memorabile come il luogo in cui questa importantissima misura fu ottenuta per la prima volta. Questo valore fu tuttavia stabilito non mediante raggi catodici ma in base

all'osservazione delle particelle lentamente semoventi nella conduttività dei gas.

Quando un gas è posto in tale stato da poter condurre elettricità, per es. a mezzo dei raggi Röntgen, esso rimane per un po' di tempo in questa posizione, anche dopo che questi raggi sono stati soppressi. Se tuttavia il gas viene fatto gorgogliare attraverso acqua o filtrato attraverso a un tappo di ovatta, la sua conduttività scompare. Così quando il gas è fatto passare fra due piastre, di cui una possiede un'alta carica negativa mentre l'altra è isolata, le particelle negative si porteranno tutte verso la piastra isolata e la loro carica totale potrà essere misurata da un elettrometro collegato alla piastra stessa. Questa carica sarà evidentemente eguale a $n e$ in cui n è il numero delle particelle ed e la loro carica. La carica totale $n e$ essendo misurata, occorre ancora determinare il valore di n per trovare e ossia la carica di ciascuna particella. Questo è il « famoso esperimento-calcolo » di J. J. Thomson descritto con assai più grande evidenza con le sue stesse parole (1):

« Il metodo col quale potei determinare il va-
« lore di n si basa sulla scoperta di C. T. R.
« Wilson, che le particelle cariche agiscono come
« nuclei attorno ai quali si condensano delle pic-
« cole goccie di acqua quando le particelle sono

(1) V. J. J. Thomson, *Electricity and Matter*, 1904, p. 75.

« circondate da aria umida raffreddata fin sotto
« al punto di saturazione.
« Nell'aria libera da polvere, come Aitken
« potè dimostrare, è molto difficile di ottenere
« una nebbia raffreddando l'aria, poichè non esi-
« stono nuclei che possano provocare la con-
« densazione. Se tuttavia nell'aria libera da
« polvere esistono delle particelle cariche, si
« depositerà intorno alle stesse una nebbia pro-
« ducendosi una soprasaturazione molto minore
« di quella necessaria a produrre qualsiasi ef-
« fetto apprezzabile quando non sono presenti
« particelle cariche. Così, in aria umida suffi-
« cientemente soprasatura, si verifica la forma-
« zione di una specie di nuvola in seno a cia-
« scuna particella carica e queste particelle sono
« per tal modo visibili. È questo il primo passo
« per poterle contare. Queste goccie sono però
« ancora troppo piccole e troppo numerose per
« contarle direttamente. Possiamo però osser-
« varne il numero indirettamente procedendo
« nel modo seguente: Supponiamo di avere una
« quantità di queste particelle in aria priva di
« polvere ed in un recipiente chiuso in cui l'aria
« sia satura di vapore acqueo e supponiamo di
« produrre una subitanea espansione dell'aria
« nel recipiente. L'aria così raffreddata, diven-
« terà soprasatura di vapore e goccioline si de-
« positeranno intorno a ciascuna delle particelle
« cariche. Ora se conosciamo l'entità dell'espan-
« sione prodotta possiamo calcolare il raffred-
« damento del gas e quindi la quantità di acqua

« depositata. Conoscendo così il volume del-
« l'acqua in forma di goccioline basterà cono-
« scere il volume di una gocciolina per dedurre
« il numero di esse. Per trovare le dimensioni
« di una gocciolina noi ci basiamo su un valore
« trovato da Sir George Stokes riguardo al
« rapporto di caduta di piccole sfere nell'aria.
« In conseguenza della vischiosità dell'aria i
« corpi piccoli cadono in essa assai lentamente
« e quanto più piccoli essi sono tanto più len-
« tamente essi cadono. Stokes dimostrò che se a
« è il raggio di una goccia d'acqua, la velocità v
« con cui essa cade nell'aria è data dall'equa-
« zione

$$v = \frac{2}{9} \frac{g a^2}{\mu},$$

« in cui g è l'accelerazione dovuta alla gravità
« $= 981$ e μ il coefficiente di vischiosità del-
« l'aria $= 0{,}00018$.

« Così:

$$v = 1{,}21 \times 10^6 a^2,$$

« Basterà quindi trovare v e potremo determi-
« nare il raggio e quindi il volume della goccia.
« Ma v evidentemente è la velocità con cui la
« nuvola che avvolge le particelle cariche cade,
« e questa velocità può essere facilmente misu-
« rata osservando il movimento della sommità
« di una nuvola. Trovo così il volume delle goc-
« cioline e quindi n numero delle particelle. Il
« prodotto $n e$ essendo stato determinato con
« misure elettriche, il valore di e può essere

« ricavato quando n sia noto. Si trovò per tal « modo che il suo valore è di

$$3,4 \times 10^{-10} \text{ unità elettrostatiche c. g. s.}$$

« Furono fatti esperimenti coll'aria, coll'idrogeno « e coll'anidride carbonica e si trovò che gli « ioni avevano cariche eguali in tutti questi gas, « valido argomento a suffragare la teoria ato« mica dell'elettricità ».

Il rapporto $\frac{e}{m}$ è lo stesso per i raggi catodici, per i trasportatori a carica negativa nelle scariche elettriche, e per le particelle elettrizzate negativamente che vengono emesse dai metalli quando sono esposti alla luce ultra-violetta o portati alla temperatura dell'incandescenza. In ogni caso la carica delle particelle è la stessa e la loro massa è inferiore a un millesimo della massa dell'atomo di idrogeno. J. J. Thomson propose il nome di ' corpuscoli ' per queste unità naturali di elettricità negativa. « Questi « corpuscoli sono sempre gli stessi qualunque « sia il modo in cui l'elettricità venne prodotta « e ovunque essi vengano incontrati. L'elettri« cità negativa contenuta in un gas tenuto a « bassa pressione ha una struttura analoga a « quella di un gas in cui i corpuscoli prendono « il posto delle molecole. Il ' fluido elettrico « negativo ', per adoperare l'antica nomencla« tura, assomiglia a un fluido gassoso, avente « una struttura *corpuscolare* anzichè molecolare ».

Invece della parola « corpuscolo » venne adottata quasi universalmente la parola « elettrone »

proposta dal Dr. G. Johnstone Stoney, essendo più specializzata e non suscettibile di confusione. Il Prof. Thomson riassume le sue conclusioni nel seguente passaggio, in cui ho sostituito « elettroni » a « corpuscoli » (1):

« Questi risultati ci guidano a un concetto « dell'elettrizzazione che ha una somiglianza stu- « pefacente con la teoria del fluido unico di « Franklin. Invece di ritenere, col Franklin, « che il fluido elettrico sia elettricità positiva, « noi lo riteniamo come elettricità negativa. Il « 'fluido elettrico' di Franklin corrisponde a una « riunione di elettroni, l'elettrizzazione negativa « essendo appunto un aggruppamento di elet- « troni. Il trasporto dell'elettrizzazione da un « luogo all'altro è effettuato dal movimento degli « elettroni dalla località in cui vi è un aumento « di elettricità positiva a quelle località in cui « vi è un aumento di elettricità negativa. Un « corpo elettrizzato positivamente è un corpo « che ha perduto qualcuno dei suoi elettroni. « Abbiamo veduto che la massa e la carica degli « elettroni sono stati determinati direttamente « per mezzo di esperimenti. In realtà noi ab- « biamo maggior numero di nozioni relative al « 'fluido elettrico' 'che non ai fluidi come « l'aria e l'acqua' ».

Compiuti una volta questi notevoli esperimenti, essi vennero più e più volte ripetuti con preci-

(1) V. J. J. Thomson, op. cit., p. 88.

sione sempre più grande. Gli elettroni sono stati scoperti in molti altri campi di investigazioni scientifiche, specialmente nei fenomeni del *radium*, le cui radiazioni sono costituite da raggi catodici o elettroni proiettati. Il rapporto $\frac{e}{m}$ e il valore di e e di m sono ora conosciuti con esattezza notevole, quantunque il rapporto sia assai più facile a determinarsi che non i due termini di esso. Col progredire della scienza sperimentale sono pure progrediti i principi teorici, e la teoria degli elettroni è stata sviluppata matematicamente ed ha portato a risultati ed a calcoli assai notevoli. Ma le misure effettuate nel periodo 1896-1898 e sopra accennate formano il fondamento su cui venne grado grado a costituirsi l'edifizio imponente dell'intera teoria degli elettroni.

CAPITOLO XII.

Elettricità e luce.

La scoperta che la luce consiste di onde di forza elettrica e magnetica (p. 219), contribuì grandemente allo sviluppo delle scienze dell'elettricità e dell'ottica. Tale scoperta essendo stata effettuata prima del sorgere della teoria degli elettroni, venne matematicamente formulata mediante equazioni differenziali assai poco in correlazione colla struttura della materia come è attualmente intesa. La teoria elettro-magnetica della luce si sostituì alla precedente teoria che si riferiva all'etere come corpo che si comporta come un solido elastico ovunque si tratti di vibrazioni molto rapide. Ma la base sperimentale della teoria elettro-magnetica era assai limitata ed essa lasciava un gran numero di fenomeni senza spiegazione, specialmente quelli dell'assorbimento e della dispersione della luce. La cura principale dei seguaci di questa teoria era quella di far risaltare ad ogni occasione che l'intima

struttura delle sostanze, la cui capacità induttiva o la permeabilità magnetica figurava nelle formole da essi adoperate, era interamente ignorata. Nella sua « Teoria dell'ottica », il professore Schuster accenna a questa tendenza colle parole seguenti:

« Non esiste oggidì alcuna teoria dell' ottica « nel senso in cui esistette 50 anni fa la teoria del « solido elastico. Noi abbiamo abbandonato ora « questa teoria e abbiamo imparato che le on- « dulazioni della luce sono onde elettro-magne- « tiche che differiscono soltanto nelle dimensioni « lineari dai turbamenti che sono generati da « correnti elettriche oscillanti o da magneti in « movimento. Ma fino a tanto che il carattere degli « spostamenti che costituiscono queste onde ri- « marrà indefinito, non potremo pretendere di « avere stabilito una teoria della luce. Questa limi- « tazione delle nostre cognizioni, che in un senso « sarebbe un regresso dal punto di vista fi- « losofico dei fondatori della teoria ondulatoria, « non è sempre abbastanza riconosciuta, anzi « talvolta la si vuole ignorare completamente. « I credenti nella possibilità di una unica con- « cezione meccanica dell'universo, i quali non « abbandonano volentieri quei metodi che dai « tempi di Galileo e di Newton condussero « sempre esclusivamente al successo, devono « osservare col più serio interesse lo svolgersi « di una scuola scientifica che si accontenta di « stabilire equazioni che rappresentano con esat- « tezza i rapporti numerici tra fenomeni diversi,

« quantunque nessun significato preciso possa « venire attribuito ai simboli adoperati. Il fatto « che questa scuola, così detta filosofica, ot- « tenne valido appoggio negli scritti di Enrico « Hertz, rende tanto più necessario di trattarla « seriamente e di strenuamente lottare per resi- « stervi ».

La teoria degli elettroni, basandosi sui portatori elementari dell'elettricità, fornì un'arma poderosa nelle controversie riguardanti i fenomeni dell'ottica e per essa si potè compiere un progresso notevole per la loro delucidazione. Ci vorrà però ancora molto tempo prima che i fenomeni dell'ottica possano essere completamente coordinati e collegati coi fenomeni chimici, elettrici. La varietà di questi fenomeni è pressochè infinita e la completa spiegazione di essi implica una totale rivoluzione della teoria non soltanto dell'ottica, ma altresì della chimica. Dovrò quindi limitarmi a qualche rapido cenno dei fatti più importanti.

a) Rifrazione. — Le onde elettro-magnetiche sono trasmesse colla velocità della luce (3×10^{10} cm. al sec.) in mezzi liberi da cariche elettriche. Questo è un modo di stabilire la teoria della rifrazione basata su quella degli elettroni. Ciò significa che quando il progredire di un'onda viene ritardato, questo ritardo è dovuto alla presenza di elettroni o di atomi positivi. È appunto la presenza degli elettroni che spiega la capacità specifica d'induzione o costante dielettrica di un mezzo (v. p. 63), e la teoria di Maxvell indica

una semplice relazione fra la velocità di propagazione v di un'onda elettro-magnetica attraverso un mezzo, e la sua costante dielettrica K. Essa è la seguente:

$$v^2 = \frac{1}{K}$$

cioè il quadrato della velocità dell'onda è inversamente proporzionale alla costante dielettrica. Vediamo quale aiuto ci può dare la nostra teoria per spiegare questo fatto.

La forza agente fra due corpi carichi, aventi rispettivamente le cariche E ed E_1, e distanti di 1 cm. uno dall'altro è

$$\frac{EE_1}{Kd^2}$$

cioè la forza diminuisce coll'aumentare della costante dielettrica. Ora, secondo la nostra teoria, un corpo « dielettrico » è un corpo composto di molecole o di atomi a cui aderiscono intimamente degli elettroni in modo tale che sono in numero assai piccolo gli elettroni che errano liberamente fra gli atomi. Quando un corpo dielettrico viene introdotto nello spazio interposto fra due piastrine, di cui una carica è positivamente e l'altra negativamente, gli elettroni vengono attratti verso la piastra positiva e gli atomi positivi verso la piastra negativa. Ciascun elettrone viene così separato dal suo atomo, ma non tanto da poter essere attratto dall'atomo vicino. Gli elettroni disposti sulla superficie affacciata alla piastra positiva costituiscono una carica negativa

superficiale e gli atomi positivi affacciati alla piastra negativa costituiscono una carica positiva superficiale; e queste cariche superficiali liberando l'interno del dielettrico da una parte della sua carica elettrica, riducono il campo interno e riducono per tal modo anche la differenza di potenziale fra le piastre del condensatore, aumentando la capacità dello stesso. Tanto sia detto per la costante dielettrica.

Per quanto si riferisce alla propagazione delle onde supponiamo di eccitare una corrente oscillatoria che percorra dall'alto al basso e dal basso in alto una delle due piastre; in altre parole facciamo in modo che gli elettroni liberi della piastra stessa oscillino con rapida successione, ciò che, come è spiegato a pag. 196, conduce ad una rapida corsa verso l'alto o verso il basso di tutti gli elettroni nello spazio circostante. Nella metà superiore della sua corsa l'elettrone oscillante è soggetto ad una forza diretta verso il basso e quindi emette un impulso diretto verso l'alto nello spazio circostante. Ogni elettrone che seguirà questo impulso oscillerà quindi in direzione contraria e neutralizzerà in certa misura l'effetto dell'oscillazione originaria che si produce nello spazio sottostante, in modo simile a quello che avviene per le oscillazioni prodotte in una corda tesa, in cui il peso di un elemento di lunghezza protegge per un attimo l'elemento che segue immediatamente, dal seguire l'oscillazione. Quanto più grande è il numero degli elettroni capaci di oscillare, contenuti nel dielettrico,

tanto più deboli saranno le forze che tendono a mantenere in posizione gli elettroni e tanto più lentamente avverrà la propagazione delle onde elettriche. Queste condizioni sono appunto quelle che si verificano nel caso di un'alta costante dielettrica, e cioè un'alta costante dielettrica significa una lenta propagazione delle onde, e viceversa. La precisa relazione numerica fra queste due quantità non è ancora resa evidente dalle considerazioni sopra esposte, ma un semplice richiamo alle leggi comuni della propagazione ondulatoria spiegherà le leggi di Maxwell in un modo molto semplice. Sempre quando un'onda viene propagata in un mezzo qualsiasi, noi troviamo che la velocità di propagazione è proporzionale alla radice quadrata della forza che tende a riportare il corpo nella posizione da cui venne a forza distolto. Ora, nel caso di un elettrone sottoposto a impulsi periodici in direzioni opposte, la velocità con cui esso segue gli impulsi dell'oscillazione primitiva e quello di altri elettroni dipende dall'energia dell' impulso così trasmesso. Ora, la forza sviluppantesi in un dielettrico varia, come abbiamo visto dianzi, in ragione inversa della costante dielettrica K. Quindi, la velocità di propagazione, che varia in proporzione della radice quadrata della forza, varierà come

$$\frac{1}{\sqrt{K}}.$$

Quindi:

$$v^2 = \frac{1}{K}.$$

Questo rapporto vale quando le oscillazioni della piastra del condensatore sono lente e molto inferiori al periodo naturale di oscillazione degli elettroni intorno ai loro atomi positivi.

Quando un'onda elettro-magnetica giunge a un corpo dielettrico la sua velocità diminuisce. Quando l'onda colpisce la superficie ad angolo retto, essa si propaga nella stessa direzione, però più lentamente di prima, e la fronte dell'onda è sempre parallela alla superficie. Quando però l'onda colpisce ad angolo la superficie, la porzione che giunge la prima viene ritardata prima delle altre parti e la fronte dell'onda si ripiega ossia « si rifrange ». Le leggi di questa rifrazione sono quelle che si trovano esposte anche negli antichi testi per l'ottica.

b) Dispersione e colore. — Il fenomeno dovuto ai prismi e la dispersione sono generalmente da attribuirsi a talune onde che sono propagate con lentezza maggiore delle altre. Esse sono quindi rifratte in grado diverso e si scindono nel nostro spettro luminoso. Questo fenomeno dicesi di dispersione. È notevole il fatto che la teoria della dispersione fu il punto di partenza della teoria degli elettroni. Una teoria basata sugli spostamenti e sulle vibrazioni di cariche elementari fu applicata alla dispersione dal professore Lorentz di Amsterdam parecchi anni prima che ciò venisse confermato dal fenomeno di Zeeman. In fatto i fenomeni della dispersione furono sempre un ostacolo nella teoria di Maxwell e di Hertz, che non ci diedero infatti alcuna spie-

gazione di essi. La teoria della dispersione, basata su quella degli elettroni, è stata elaborata specialmente per opera di Schuster di Manchester e di Drude di Giessen. Quest'ultimo la riassunse mediante un'equazione (1) che crediamo bene di riportare qui come esposizione assai concisa di questa teoria.

Eccola:

$$n^2 = 1 + N\theta + \frac{N\theta L^2}{\lambda^2 - L^2}$$

in cui n è l'indice di rifrazione, N il numero di elettroni contenuti in un cm³, λ la lunghezza d'onda della luce incidente, L la lunghezza dell'onda naturale emessa dagli elettroni nelle loro oscillazioni ordinarie e θ è inversamente proporzionale alla forza che tende a mantenere gli elettroni nelle loro posizioni centrali (2).

Da questa equazione si possono ricavare molte deduzioni assai interessanti. Anzitutto se $N = 0$, $n^2 = 1$ e $n = 1$. Cioè la velocità nel dielettrico è la stessa che nell'etere puro. Sono soltanto gli elettroni quelli che ritardano la corsa. Inoltre quanto più grande è θ, tanto più grande è l'indice di rifrazione, e tanto più lentamente si propaga l'onda nel dielettrico. Questo fu già accennato a proposito della rifrazione.

Il primo e il secondo termine a destra del segno di eguaglianza sono indipendenti dalla

(1) P. Drude, *Annalen der Physik*, N. 9, 1904, p. 681.
(2) L'autore chiama la forza θ col nome di *laxity*. (N. d. Tr.).

lunghezza d'onda λ e se si dovessero considerare soltanto questi due termini non si verificherebbe dispersione. Il terzo termine però contiene λ e vediamo subito che il suo ammontare dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente e delle onde emesse dagli elettroni vibranti. Se λ è molto grande in paragone di L, possiamo trascurare L^2 in confronto di λ^2 e considerare $\lambda^2 - L^2 = \lambda^2$; il terzo termine diventa approssimativamente

$$= \frac{N\theta L^2}{\lambda^2}.$$

Siccome λ decresce gradatamente, questo termine aumenta pure gradatamente e quindi anche n cresce nella stessa proporzione. Ciò significa che *quanto più brevi sono le onde, tanto più esse sono rifratte*. Chiunque osservi uno spettro formato da un prisma vedrà che i raggi azzurri che hanno una lunghezza d'onda assai limitata, sono maggiormente deviati dei raggi rossi che hanno una lunghezza d'onda maggiore. Questo è quello che si dice *dispersione normale*.

Quando λ è eccessivamente grande — cioè l'oscillazione incidentale è eccessivamente lenta — il terzo termine si riduce a zero e l'equazione diventa:

$$n^2 = 1 + N\theta,$$

che è indipendente dalla lunghezza d'onda, cosicchè *le onde molto lunghe non sono disperse*. Esse si propagano tutte colla stessa velocità, che

dipende semplicemente dalla densità e dalla forza θ degli elettroni nel mezzo. Si può comprendere questa dipendenza ricordando che « l'indice di rifrazione » n di un mezzo è il rapporto della velocità di propagazione della luce nell'etere alla velocità nel mezzo:

$$n = \frac{V_1}{V}$$

in cui V_1 è 3×10^{10} cm. al secondo. Abbiamo quindi:

$$n^2 = \frac{V_1^2}{V^2} = 1 + N\theta$$

ovvero:

$$V^2 = \frac{V_1^2}{1 + N\theta}.$$

Quest'ultima equazione ci insegna molte cose utili a sapersi. Per onde lunghe la velocità di propagazione in un dielettrico dipende dalla velocità delle stesse nell'etere e da un termine che contiene la densità e la forza θ degli elettroni nel mezzo. Quanto più sono numerosi gli elettroni, tanto più facilmente essi possono essere spostati dalle loro posizioni, tanto più lentamente le lunghe onde li possono attraversare. Ma abbiamo visto anche che

$$V^2 = \frac{1}{K}.$$

Quindi abbiamo:

$$\frac{V_1^2}{1 + N\theta} = \frac{1}{K};$$

ossia:

$$K = \frac{1 + N\theta}{V_1}.$$

Questa è una formola importante che definisce la capacità specifica induttiva (o « costante dielettrica ») K in relazione alla teoria degli elettroni. Essa potrebbe venire calcolata conoscendo la densità e la forza θ degli elettroni nella sostanza. E, inversamente, noi possiamo calcolare il prodotto della densità e della forza θ se conosciamo la costante dielettrica.

Torniamo ora all'equazione di Drude:

$$n^2 = 1 + N\theta + \frac{N\theta L^2}{\lambda^2 - L^2}.$$

Quando λ diventa piccolissimo il terzo termine diventa grandissimo e la rifrazione è assai pronunziata. Quando $\lambda = L$ — cioè quando la luce incidente ha il periodo naturale degli elettroni — una situazione straordinaria si produce. Il denominatore diventa zero e quindi la frazione diventa infinita. Quindi anche n^2 diventa infinito e la velocità di propagazione diventa zero. *L'onda è arrestata.* Se λ diminuisce ancora di più, il denominatore aumenta ancora, ma diventa una quantità negativa. Ciò significa che l'indice di rifrazione risulta minore invece che più grande. Quando la differenza $\lambda^2 - L^2$ è sempre molto piccola, il terzo termine è una quantità negativa assai grande che potrebbe benissimo essere ancora molto più grande del secondo termine. In questo caso si verificherebbe il fatto ancora più

straordinario di n^2 inferiore all'unità; in altre parole una vibrazione che sia di pochissimo più breve della vibrazione naturale degli elettroni *si propaga con velocità superiore a quella della luce.*

Se λ diminuisce ancora di più, il denominatore aumenta e il terzo termine diventa più piccolo. Il limite è raggiunto quando $\lambda = 0$; allora abbiamo infatti:

$$n^2 = 1 + N\theta + N\theta \frac{L^2}{L^2} = 1 + 2 N\theta$$

e anche in questo caso abbiamo un valore limite per le onde infinitamente brevi, valore alquanto superiore al valore per onde infinitamente lunghe e sempre indipendente dalla lunghezza d'onda. Le onde infinitamente brevi non vengono parimenti disperse.

In generale, possiamo enunciare la conclusione che gli elettroni o altri corpi carichi influenzano la velocità di propagazione dell'onda incidente solo *quando il periodo di oscillazione di essa onda è casualmente poco differente dal loro periodo.*

Il fenomeno eccezionale che si verifica quando i due periodi di oscillazioni quasi coincidono, dicesi *dispersione anomala.*

c) Assorbimento e riflessione. — Quando la lunghezza d'onda di un'onda di luce incidente è eventualmente eguale alla lunghezza dell'onda naturale dell'elettrone, l'onda si arresta. Come abbiamo visto nell'esempio elementare sopra considerato, gli elettroni si trovano sempre nella

fase opposta a quella della oscillazione originale. Essi compensano quindi l'onda incidente e impediscono che essa eserciti alcun effetto nell'interno del corpo. Ma ciò facendo essi devono, com'è ovvio, assorbire una quantità di energia più grande che nelle condizioni ordinarie. La conseguenza si è che gli elettróni vengono scossi e sbalzati fuori della loro orbita normale in prossimità dei rispettivi atomi positivi e vengono lanciati nell'interno della sostanza, ove errano liberi e urtano contro altri atomi con rapida vicenda. Ciascuna collisione significa un arresto per l'elettrone e quindi l'eccitazione di un impulso in forma d'onda elettro-magnetica. Questi impulsi irregolari costituiscono il calore radiante che si diffonde nello spazio e si disperde. L'intero processo dicesi « assorbimento » e significa che la luce incidente non viene trasmessa, ma si converte in calore nel modo indicato.

Può però accadere che gli elettroni non vengano sbalzati per tal modo, ma continuino a vibrare in corrispondenza col periodo della vibrazione incidente, o meglio seguendolo di un mezzo periodo. Essi costituiranno allora probabilmente una serie di sorgenti luminose indipendenti che irradieranno luce nello spazio accanto alla luce incidente. Avremo allora un fenomeno di « riflessione ». Se la superficie è perfettamente levigata e contiene elettroni dello stesso periodo, la riflessione sarà geometrica o « regolare ». L'angolo di riflessione sarà eguale all'angolo d'incidenza. La spiegazione che qui occorre è quella

che si trova negli ordinari libri di testo e che si basa sul principio di Huyghen.

In pratica, si trovò che la maggior parte dei corpi può essere levigata e che tutti i corpi riflettono luce in certa misura. Ciò significa che tutti i corpi conosciuti contengono degli elettroni (per quanto essi possano anche essere in piccolo numero), vibranti nel periodo della luce incidente.

d) Polarizzazione. — Abbiamo varie specie di luce in corrispondenza dei vari modi in cui avvengono le vibrazioni elettro-magnetiche. Quando gli elettroni vibrano in una stessa linea retta verticale, la luce dicesi *piano-polarizzata* in un piano orizzontale. Quando essi vibrano seguendo un'orbita circolare, la luce emessa lungo l'asse di quest'orbita è « circolarmente polarizzata » e questa polarizzazione circolare può essere diretta a destra o a sinistra a seconda della direzione di rotazione. Se l'orbita è ellittica, la luce è polarizzata ellitticamente. Finalmente gli elettroni, o delle aggregazioni di essi, possono emettere luce che assume a vicenda tutte queste varie polarizzazioni ed abbiamo allora la luce naturale o ordinaria.

La luce ordinaria può essere convertita in luce piano-polarizzata facendola attraversare un corpo i cui elettroni siano capaci di vibrare in un solo piano, come la formalina. Questa luce trasmessa risulterà piano-polarizzata in un piano ad angoli retti con la direzione della vibrazione.

e) Doppia rifrazione. — Il calcare è un car-

bonato di calcio di formola $CaCO^3$. Ciascuna molecola di questo corpo contiene cinque elettroni capaci di vibrare in modo abbastanza indipendente. Due soli fra essi sono però liberi di vibrare nella direzione dell'asse di cristallizzazione. Gli altri tre, se pure vibrano intorno a questo asse, lo fanno con grande rapidità, occasionando una forza θ, molto piccola. La conseguenza si è che quando un fascio luminoso attraversa del calcare ad angolo retto col suo asse, solo due elettroni per ogni molecola prendono parte alla vibrazione. Il termine $N\theta$ nell'equazione di Drude è quindi piccolo e l'indice di rifrazione è pure piccolo e la velocità di propagazione è grande. Se, d'altra parte, un fascio luminoso viene diretto lungo l'asse, tutti e cinque gli elettroni prendono parte alla vibrazione e quindi $N\theta$ è più grande, n è pure maggiore e la velocità diminuisce. La luce è quindi trasmessa con maggior lentezza lungo l'asse che non trasversalmente ad esso, risultandone il fenomeno della doppia rifrazione.

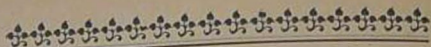
f) Rotazione ottica. — Quando un fascio luminoso piano-polarizzato viene trasmesso attraverso la trementina, o una soluzione zuccherina, o una lastra di quarzo, o altre sostanze, il suo piano di polarizzazione all'emergenza risulta aver compiuto una ruotazione.

Questo fenomeno sarebbe di difficile spiegazione, senonchè si può osservare che una vibrazione armonica può sempre essere considerata

come risultante da due vibrazioni circolari in direzioni contrarie.

Una di queste vibrazioni circolari è trasmessa con velocità maggiore dell'altra e quando i due fasci circolari si ricombinano in un fascio emergente piano-polarizzato, il piano ha compiuto un giro nella direzione della vibrazione circolare che è stata trasmessa più rapidamente.

Nei cristalli questa rotazione può essere considerata come dovuta alla più grande facilità per gli elettroni di acquistare accelerazione in un senso piuttosto che nell' altro a cagione della configurazione degli atomi nella molecola e della disposizione delle molecole secondo linee determinate. Nelle soluzioni e nei liquidi, per contro, il fenomeno può attribuirsi alla struttura asimmetrica delle molecole, che è sempre la stessa da qualunque parte la si guardi. Infatti la rotazione si produce nello stesso senso, qualunque sia la direzione della trasmissione.

In fatto, Becquerel ha dimostrato che le molecole di tutte le sostanze che dànno luogo alla rotazione ottica (o « polarizzazione rotatoria »), allo stato liquido contengono atomi di carbonio non saturi.

CAPITOLO XIII.

Fenomeni magneto-ottici.

La correlazione tra i fenomeni magnetici e i fenomeni luminosi fu oggetto di molti studi dopo che Faraday scoperse un fenomeno che collegava il dominio dell'ottica a quello del magnetismo. Si sa oggidì che il magnetismo esercita influenza sul piano di polarizzazione della luce così quando il campo magnetico è applicato alla sorgente luminosa come quando esso viene applicato alla sostanza che trasmette la luce. Il primo caso dà luogo al fenomeno di Zeeman e il secondo alla rotazione o girazione magneto-ottica e comprende i fenomeni scoperti da Faraday, Kerr, Macaluso e Corbino.

a) Il fenomeno di Zeeman. — Trattando dei fenomeni della radiazione e del diamagnetismo, abbiamo parlato dell'effetto prodotto da un campo magnetico sulle rivoluzioni di un elettrone intorno ad un atomo positivo. Abbiamo veduto che qualunque variazione si produca essa

tende a opporsi al campo magnetico che l'ha originata. Il diamagnetismo è una specie d'induzione elettro-magnetica permanente. Sappiamo che le correnti indotte sono sempre opposte alla carica che ha prodotto l'induzione. Avviene come se il momento elettrico — il momento della carica elettrica — distrutto in un corpo riapparisse in un altro, come se in ogni collisione vi fosse un trasferirsi dei momenti, la somma di tutti i momenti rimanendo la stessa, l'azione e la reazione essendo eguali ed opposte. Le correnti indotte ordinarie sono di breve durata, semplicemente perchè gli elettroni in movimento consumano tutta la loro energia nelle collisioni cogli atomi neutri. Se le correnti indotte sono di dimensioni molecolari e causate dall'accelerazione e dal ritardo delle rivoluzioni dell'elettrone intorno all'atomo positivo, esse sono permanenti fino a quando il campo d'induzione permane con eguale valore. Quando il campo è annullato, l'accelerazione che esso produce è convertita in un ritardo, e viceversa.

Tutti i corpi sono originariamente diamagnetici e in tutti i corpi gli effetti sopra indicati si producono sempre quando il campo magnetico varia. Ciò è reso evidente dagli effetti magneto-ottici più oltre descritti.

Che un campo magnetico eserciti un'azione sulla luce trasmessa attraverso un mezzo magnetizzato si sapeva già fin dalle ultime ricerche di Faraday. Ma l'effetto prodotto da un campo magnetico sullo spettro di una fiamma, cioè su di

una sorgente luminosa venne studiato ripetutamente ma senza risultato. Il merito di aver scoperto questo effetto e trovato la spiegazione matematica di esso appartiene esclusivamente all'Olanda. Il dott. P. Zeeman di Leyda annunziò la sua scoperta nel 1897, dopo aver già precedentemente compiuto un altro esperimento senza risultato. La seconda volta egli impiegò un magnete assai più forte e un apparecchio spettroscopico più perfezionato di quelli usati dai suoi predecessori e da lui stesso nell'esperimento antecedente. Egli dispose una fiamma Bunsen contenente sale comune fra i poli di un elettromagnete e mise a foco la luce in relazione colla fessura del suo spettrometro, disponendo la fiamma in modo che le linee D apparissero assai definite. Non appena il magnete veniva eccitato entrambe queste linee si allargavano di molto. Mediante una serie accurata di esperimenti sussidiari egli dimostrò che questa espansione era dovuta direttamente all'azione del campo, e non era un effetto secondario come potrebbe venire cagionato da una variazione di densità della fiamma.

Questi risultati vennero comunicati, innanzi la loro pubblicazione, al prof. Lorentz il quale dimostrò al dott. Zeeman come questa espansione poteva essere predetta in base alla teoria del Lorentz, per cui la luce è generata dalla vibrazione di particelle cariche elettricamente o elettroni; e che questa stessa teoria indicava che gli orli di queste linee allargate dovrebbero essere

piano-polarizzate o polarizzate circolarmente a seconda che la luce che perviene alla fessura vi giunge dalla sorgente luminosa in una direzione perpendicolare o parallela alle linee della forza magnetica; e che l'entità dell'espansione misurerebbe il rapporto della carica alla massa delle particelle luminose. Zeeman potè verificare completamente queste predizioni per quanto ha rapporto alla polarizzazione e dedusse dalle equazioni del Lorentz, come valore approssimativo per il rapporto $\frac{e}{m}$, quello di 10^7 unità elettromagnetiche per gramma. Questo è all'incirca una metà del valore dello stesso rapporto per gli elettroni, come venne determinato in appresso.

Investigazioni ulteriori dimostrarono poco dopo che l'apparente espansione delle linee è dovuta in realtà alla loro suddivisione in vari componenti. Questa ripartizione è diversa in relazione colla direzione in cui il fascio di luce proveniente dalla sorgente luminosa, attraversa il campo magnetico. Quando la sorgente veniva osservata nella direzione delle linee di forza magnetica, le linee D apparivano come doppie, e quando la linea di traguardo era disposta ad angolo retto colle linee di forza, le linee D apparivano come triplicate. La polarizzazione delle linee differisce anche in relazione alla linea di traguardo, il raddoppiamento consistendo di due linee polarizzate circolarmente in direzioni opposte e la triplicazione consistendo di linee piano-polarizzate, il piano della linea centrale essendo ad angolo retto con

quello delle linee laterali. Questi effetti complessi venivano spiegati interamente dalla teoria degli elettroni, come proposta dal prof. Lorentz di Amsterdam. Questa teoria venne considerata come puramente speculativa fino a che non ebbe una smagliante conferma. La scoperta del fenomeno di Zeeman (in unione all'esperimento numerico del Thomson) convertì la speculazione in una teoria di un'efficacità e universalità mai raggiunte prima d'ora in questo campo.

In considerazione dell'importanza dell'effetto di Zeeman io tenterò di esporne la teoria nel modo più chiaro possibile, e lo studente volenteroso farà bene di rendersene esatto conto anche a prezzo di qualche sforzo.

La teoria del Lorentz supponeva che le vibrazioni luminose fossero dovute alla rotazione di « molecole elettriche » intorno alle masse che le attraggono. Lorentz ignorava completamente la natura della carica e la massa di queste molecole allorchè formulò la sua teoria, e non pare che ne sospettasse l'identità cogli agenti che trasportano l'elettricità nell'elettrolisi. Egli suppose che queste molecole girassero a caso in tutte le direzioni e secondo orbite varianti da un circolo ad un'ellisse, e persino seguendo una linea retta. Sapendo che un corpo carico viene deviato nel suo percorso per l'azione di un magnete, egli si attendeva di trovare che queste orbite venivano influenzate da un campo magnetico ma non possedeva alcun dato per argomentare se un tale effetto avrebbe potuto essere

rivelato sperimentalmente. Ma quando il fenomeno fu scoperto, la sua teoria si trovò pronta a darne l'immediata spiegazione e persino ad aggiungere particolari che non erano stati per anco osservati ma che con esperienze ulteriori vennero immediatamente verificati.

Consideriamo un fascio luminoso emanato da una fiamma al sodio disposta fra i poli di un potente elettro-magnete producente un campo di 5000 unità e osserviamolo lungo le linee di forza magnetica per mezzo di fori praticati a tale scopo nelle porzioni polari. Uno spettrometro sensibile mostra le due linee gialle del sodio D_1 e D_2 aventi la lunghezza d'onda di 589,6 e 598,0 $\times 10^{-7}$ cm. rispettivamente, separate da uno spazio scuro. Non appena l'elettro-magnete è eccitato, le linee si allargano fin quasi a occupare uno spazio doppio del precedente, e quando si adopera una forte lente d'ingrandimento si vede che ciascuna linea è divisa in due, l'intervallo essendo circa $\frac{1}{50}$ di quello che separa le linee originarie. Ciò significa che il periodo della vibrazione originale è stato cambiato di circa $\frac{1}{100.000}$ del suo valore, per ogni componente. Questo effetto è molto piccolo ma può tuttavia essere rivelato dai più perfezionati apparecchi.

La vibrazione originale così modificata è data dalla rotazione di elettroni intorno agli atomi positivi. Queste rotazioni avvengono in piani qualsiasi, ma noi dobbiamo soltanto considerare la projezione delle loro orbite sulla sezione trasversale

del fascio luminoso, poichè l'occhio è colpito soltanto dalle vibrazioni trasversali, e d'altra parte basterà considerare le orbite circolari poichè tutte le altre possono venire ridotte a questa forma. Questa rotazione circolare può avvenire nella direzione delle lancette dell'orologio o anche nella direzione contraria. Parimenti le correnti molecolari degli elettroni nel magnete possono assumere entrambe queste direzioni. Supponiamo che esse avvengano nel senso delle lancette dell'orologio in relazione coll'osservatore, e cioè siano *destrogire*, cioè supponiamo che il polo più lontano dall'osservatore sia un polo che cerchi il Nord. Allora tutti gli elettroni moventisi in questa stessa direzione nella fiamma subiranno un ritardo, mentre gli elettroni di direzione opposta subiranno una accelerazione secondo le leggi dell'induzione elettro-magnetica. La differenza nel periodo, così prodotta, è, secondo il Lorentz,

$$t = \frac{e}{m} \frac{H}{4\pi} T,$$

in cui t è la differenza del tempo periodico, $\frac{e}{m}$ è il rapporto della carica alla massa per gli elettroni, H è il campo magnetico e T il periodo primitivo di tutti gli elettroni costituenti la vibrazione originale. Invece di avere un solo periodo per tutti gli elettroni si avrà una parte di essi con periodo più lungo e l'altra parte con un periodo più breve. La differenza di periodo significa una differenza nella lunghezza d'onda e una diffe-

renza nella rifrazione e quindi anche una separazione nello spettro. Questo è il fenomeno di Zeeman, come osservato nella direzione delle linee di forza. Si vedrà senza sforzo che venne così data al Lorentz opportunità di calcolare il valore di $\frac{e}{m}$, poichè tutte le altre quantità contenute nell'equazione sopra scritta, sono note (1).

L'inattesa grandezza di questo valore diede origine a varie supposizioni, ma la piccolezza della massa non poteva venire spiegata, poichè a quel tempo non si conoscevano masse di mole inferiore a quella dell'atomo di idrogeno. Un'ulteriore esame spettroscopico delle linee suddivise mostrò che esse consistono di luce polarizzata circolarmente, la direzione della rotazione essendo in direzione opposta a quella delle due linee. Zeeman trovò che gli elettroni producenti onde di maggiore lunghezza erano quelli che giravano nel senso delle lancette dell'orologio, e quelli che producevano le onde più brevi e più rifran-

---

(1) Se mettiamo $\frac{e}{m} = 1{,}9 \times 10^{7}$, $H = 5000$ e, $T = 2 \times 10^{-15}$, otteniamo:

$$t = 1{,}9 \times 10^{7} \times 5000 \times 4 \times 10^{-30} \times \frac{1}{4\pi}$$
$$= 3 \times 10^{-20}$$

e

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{66.000},$$

il che si accorda con le osservazioni, nel limite dell'errore.

gibili erano quelli che giravano in senso contrario. Ciò dimostrava che *le rotazioni producenti la luce erano soltanto quelle delle particelle cariche negativamente*. Infatti, noi sappiamo dalle leggi dell'induzione, che le rotazioni destrogire sono ritardate dalle correnti molecolari di elettroni aventi direzione eguale, allungandosi per tal modo le onde ed aumentandosi la rifrangibilità, mentre che le rotazioni levogire vengono accelerate.

Questo per quanto riguarda il fenomeno come osservato lungo le linee di forza magnetica. Ad angolo retto colle linee di forza si scopre una triplicazione delle linee anzichè un raddoppiamento. Le due vibrazioni circolari che abbiamo finora considerato sono vedute terminalmente e appariscono quindi piano-polarizzate, il piano di polarizzazione essendo parallelo alle linee di forza e quindi ad angolo retto colle vibrazioni degli elettroni. Vi è ancora la stessa differenza di periodo osservata dianzi, e quindi la medesima divisione dello spettro. Ma in questo caso anche le vibrazioni prodotte *lungo* le linee di forza colpiscono l'occhio senza subire tuttavia l'influenza del campo magnetico, poichè gli elettroni sono soltanto influenzati da questo campo quando essi attraversano le linee di forza magnetica. Non producendosi in questo caso differenza di periodi, la vibrazione originale permane e appare una linea centrale fra le altre due linee. I raggi, essendo dovuti a vibrazioni che avvengono lungo le linee di forza, sono polarizzati in un piano ad angolo retto colle linee di forza.

In questo caso non vi può essere alcun dubbio circa la direzione della vibrazione delle particelle che dànno origine alla luce polarizzata e per tal modo viene sedata un'antica controversia nel campo dell'ottica, già in parte risolta dagli esperimenti di Hertz.

Questo è il famoso fenomeno di Zeeman, nella sua forma più semplice. I fenomeni principali sono illustrati nel diagramma (fig. 31), in cui la

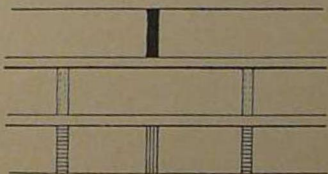



Fig. 31.

linea piena mostra l'ordinaria linea D_1, le linee punteggiate indicano le linee polarizzate circolarmente come osservate lungo le linee di forza, e le linee tratteggiate indicano le linee polarizzate in due piani differenti, come visti trasversalmente alle linee di forza.

Ma il fenomeno non è in realtà così semplice come appare dalla descrizione sopra esposta. Il fatto dell'esistenza di due diverse linee per il sodio dimostra che gli elettroni in rivoluzione intorno all'atomo del sodio hanno due diversi periodi naturali, o che ciascun atomo ha due elettroni in rivoluzione intorno ad esso, come

due satelliti con periodi differenti. Ma il fenomeno è ancora più complesso nei casi dei metalli più pesanti, in alcuno dei quali abbiamo delle centinaia di linee nello spettro, distribuite, apparentemente, a caso. Ciò significa che vi è un gran numero di elettroni aderenti a ciascun atomo, o forse a complicati gruppi di atomi, e che essi si trovano collocati nella sfera d'influenza uno dell'altro per modo che il movimento ne viene reciprocamente turbato e delle vibrazioni ulteriori di alta frequenza si sovrappongono ai periodi fondamentali. In conseguenza noi notiamo, specialmente nei metalli magnetici, la produzione del fenomeno di Zeeman in modo molto complesso, le linee essendo divise in quattro, cinque, sette e persino nove componenti. Ma, lungi dal produrre scoraggiamento, questa stupefacente varietà diede notevole impulso alle ricerche sull'intima struttura dell'atomo chimico.

Lo spettro è, per così dire, l'atlante anatomico dell'atomo chimico, l'indice di questo atlante essendo costituito dal fenomeno di Zeeman.

Infatti si è trovato che le linee di ciascun elemento possono venire raggruppate in serie diverse che si susseguono in disposizione armonica, ciascuna serie mostrando lo stesso effetto di Zeeman in tutte le linee che la compongono; questo effetto varia però con ciascuna serie. Rimane tuttavia da compiere l'analisi matematica delle vibrazioni atomiche e forse non passerà molto tempo prima che si abbiano infor-

mazioni definite circa il numero degli elettroni in rotazione intorno all'atomo di qualche elemento e circa il modo in cui questi elettroni in rivoluzione dànno origine al suo spettro complesso. Giungeremo così ad una conoscenza del sistema atomico simile a quella che abbiamo attualmente, su più larga scala, dei movimenti e delle perturbazioni dei pianeti nel sistema solare (1).

b) L'effetto di Faraday. — Il primo effetto di magneto-ottica che venne scoperto fu quello detto di Faraday. Quando dei raggi di luce gialla piano-polarizzata sono fatti attraversare nel bisolfito di carbonio contenuto in un campo magnetico di 5000 unità, nella direzione delle linee di forza, il piano di polarizzazione risulta aver ruotato di un angolo di tre gradi e mezzo per ciascun centimetro del liquido attraversato dal fascio luminoso. Il senso della rotazione è contrario alla direzione della corrente di elettroni costituente il magnete. In altre parole, la « rotazione » avviene nella stessa direzione della corrente (positiva) che eccita il magnete.

Questo fenomeno riceve facile spiegazione in base alla teoria degli elettroni.

Ciascun fascio di luce piano-polarizzata può

(1) Per una trattazione più ampia e più teorica del fenomeno di Zeeman rimandiamo il lettore studioso ai lavori del nostro Righi: *La moderna teoria dei fenomeni fisici*. Bologna, 1904, cap. II, ed. alle " Mem. della R. Acc. di Bologna ", serie 5ª, t. VIII, p. 263 (1800). (N. d. Tr.).

essere considerato come composto di due fasci circolarmente polarizzati in direzioni opposte. Il fascio vibrante circolarmente nella direzione della corrente degli elettroni del magnete subisce un ritardo a cagione della induzione molecolare entro il liquido, mentre il fascio rotante in senso opposto subisce un'accelerazione.

Perciò quando i due fasci si ricombinano emergendo fuori dal liquido, il piano è stato ruotato nella direzione della rotazione più rapida, cioè nella direzione opposta alla corrente degli elettroni nel magnete.

Questa la spiegazione del fenomeno nella sua più facile espressione. Ma questo effetto, al pari di quello di Zeeman, presenta varietà infinite nei suoi particolari. La rotazione per cm. nel campo magnetico unitario (quantità detta la costante di Verdet) varia da una sostanza all'altra ed in casi rarissimi diventa una quantità negativa. Così nel bisulfito di carbonio essa è misurata da 0,042 minuti di un arco, nell'acqua 0,012, nel vetro da 0,02 a 0,09, mentre che nell'aria compressa è di 0,0003 ed aumenta colla pressione.

Tornando ora all'equazione di Drude (p. 249), se la velocità di propagazione è v, l'indice di rifrazione n, la densità degli elettroni in rotazione N, la lunghezza d'onda da essi naturalmente emessa L e la lunghezza dell'onda incidente λ, avremo;

$$\frac{1}{v^2} = n^2 = 1 + N\theta + \frac{N\theta L^2}{\lambda^2 - L^2}$$

Quest'equazione dimostra che col crescere del periodo naturale L, la velocità v diminuisce, cioè se l'elettrone in rotazione viene ritardato per l'influenza di una forza magnetica o in altro modo qualsiasi, esso trasmette la luce incidente con velocità minore. Ora noi sappiamo che l'elettrone subisce un ritardo quando ruota nella direzione degli elettroni producenti il campo magnetico. Quindi il fascio polarizzato circolarmente, risultante dalla rotazione nel senso contrario, si propagherà con rapidità maggiore.

Nel caso sopra esposto si suppone $\lambda^2 > L^2$. Se così non fosse, il denominatore — e quindi l'intera frazione — diverrebbe negativa e quanto più grande sarà la naturale lunghezza d'onda, tanto più grande sarà la velocità. Questo è il caso della dispersione anomala che si produce quando L^2 è maggiore di λ^2, cioè quando il periodo proprio agli elettroni corrisponde allo spazio infra-rosso. La dispersione normale avviene invece quando il periodo proprio agli elettroni corrisponde allo spazio ultra-violetto.

Queste considerazioni valgono a spiegare come talvolta l'effetto di Faraday risulti invertito.

c) L'effetto di Kerr. — Kerr scoperse che la luce piano-polarizzata riflessa dalle faccie polari levigate di un elettro-magnete è polarizzata ellitticamente. Esperimenti fatti in seguito dimostrarono che questo fenomeno è un caso speciale dell'effetto di Faraday. La luce riflessa penetra sempre per una piccolissima profondità nella superficie riflettente. Così la luce riflessa dal ferro ne penetra

qualche strato molecolare per riattraversarli poi nella riflessione. Questa penetrazione è dovuta ad una trasmissione che avviene nella sostanza del ferro. Ora, essendosi esaminato del ferro allo stato di fogliolline sottilissime e trasparenti prodotte dalla disaggregazione catodica, si trovò che questa sostanza esercita in maniera molto potente l'effetto di Faraday. Non deve quindi sorprenderci il fatto che il passaggio della luce attraverso alla sottilissima fogliolina, sufficiente per produrre la riflessione, debba bastare a produrre una rotazione, assai percettibile, nel suo piano di polarizzazione, specialmente considerando che gli effetti di entrambi i passaggi sono nella stessa direzione. In questo fenomeno si verifica una differenza fondamentale dalla semplice rotazione ottica. Quando un fascio di luce viene mandato attraverso ad una sostanza « otticamente attiva », il suo piano non subisce alcuna rotazione nè all'andata nè al ritorno. La trasmissione in una direzione si compensa colla trasmissione in direzione inversa. Nella rotazione magneto-ottica per contro la rotazione del piano di polarizzazione avviene sempre nella direzione della corrente magnetizzante (positiva) e quindi la rotazione è sempre proporzionale al numero che misura il ripetersi della trasmissione del fascio.

d) L'effetto Macaluso-Corbino. — Poco dopo la scoperta di Zeeman due fisici italiani, Macaluso e Corbino, annunziarono che, trasmettendo un fascio di luce gialla piano-polarizzata attra-

verso a vapori di sodio collocati in un campo magnetico si verificava una forte rotazione magneto-ottica in prossimità delle striscie di assorbimento. Ciò deriva come naturale conseguenza dalle considerazioni e dai fatti sopra esposti.

Abbiamo veduto che, quando λ è pressochè eguale a L, il terzo termine nell'equazione di Drude diventa grandissimo e quindi la velocità di trasmissione subisce un cambiamento notevole quando la lunghezza dell'onda incidente della luce di sodio è pressochè eguale alla lunghezza d'onda del periodo proprio agli elettroni in rotazione nel campo magnetico.

Tutto il capitolo della magneto-ottica, come pure quello che seguirà riguardante effetti galvano-magnetici e termo-magnetici, si riferiscono interamente a problemi di cui si cerca tuttora la soluzione. Ma la teoria degli elettroni fu la prima che indicò le linee generali da seguirsi per giungere alla completa risoluzione di queste importanti questioni.

CAPITOLO XIV.

Elettricità, calore e magnetismo.

Nel capitolo dell'elettro-termica (p. 132) abbiamo trattato delle relazioni fra l'elettricità e il calore. Come detto dianzi, queste relazioni sono collegate all'intima struttura degli elementi chimici e sono quindi meno definiti di molte altre proprietà elettriche della materia. Se queste relazioni vengono rese più complesse dalla presenza di un campo magnetico, lo studio dei fenomeni non ne diventa per nulla facilitato, ma quanto più multiformi e complicati essi risultino, tanto più grande è il numero di informazioni che possiamo ricavarne riguardo alla intima struttura dell'atomo chimico ed alla struttura delle sostanze solide.

Facciamo attraversare una sottile lastra metallica (fig. 32) da una corrente originata dalla batteria B. Secondo la teoria degli elettroni questa corrente consiste essenzialmente nel movimento degli elettroni che vanno dall'estremo

negativo all'estremo positivo, cioè in direzione opposta a quella che chiamasi, per convenzione, « la corrente ». Gli atomi positivi si spostano nella direzione contraria, ma per la inerzia, dovuta alle loro dimensioni molto più grandi, formano una contro-corrente che si può trascurare.

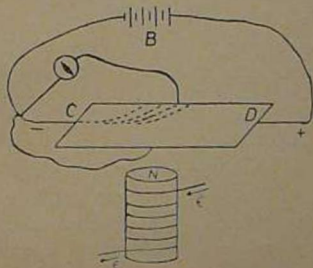



Fig. 32.

Portiamo ora sotto la piastra il polo di un elettro-magnete che si volge al Nord. Si possono osservare allora quattro fenomeni distinti:

1) 1. Una differenza di potenziale fra i lati della piastra.

2) 2. Una differenza di temperatura fra i lati della piastra.

3) 3. Una variazione nella conduttività elettrica della piastra.

4) 4. Una variazione nella conduttività per il calore.

Se, invece di una corrente elettrica, si dirige nella piastra una corrente termica nella stessa

direzione, per esempio, riscaldando la parte C fino al punto d'ebollizione e mantenendo freddo D, si possono osservare gli stessi quattro fenomeni. Abbiamo quindi otto fenomeni galvano-magnetici e termo-magnetici i quali rivelano un'intima correlazione fra le correnti termiche, elettriche e magnetiche.

Dobbiamo aggiungere subito che questi fenomeni variano molto, così in quantità come in direzione, da una sostanza all'altra e vi è una sola sostanza — il bismuto — in cui sono stati fino ad ora misurati tutti e otto questi effetti. Queste misurazioni sono assai difficili da effettuarsi a cagione delle molteplici fonti di errore e l'influenza decisiva di impurità anche minutissime. Cionondimeno furono scoperte alcune regole importanti e la teoria degli elettroni si mostrò capace di adattarsi a questi fenomeni singolari.

In ogni caso l'effetto è proporzionato all'intensità della corrente elettrica o termica. Il che è facile ad intendersi. Esso è inoltre inversamente proporzionale allo spessore della lastra, e questo ha pure facile spiegazione.

Gli effetti trasversali 1) e 2) e quelli che vi corrispondono nel caso di una corrente termica sono proporzionali al campo magnetico. Le variazioni nella conduttività si suppongono proporzionali al quadrato del campo magnetico, ma esse sono proporzionalmente molto deboli.

Effetti trasversali. — Gli effetti che avvengono nel bismuto possono venire riassunti come

segue: *Una corrente di calore produce gli stessi effetti prodotti da una corrente di elettroni.* Essa è deviata da un campo magnetico nella stessa direzione in cui sono deviati i raggi catodici.

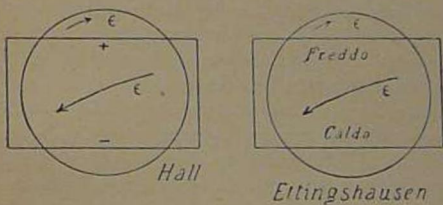



Fig. 33, *a*.

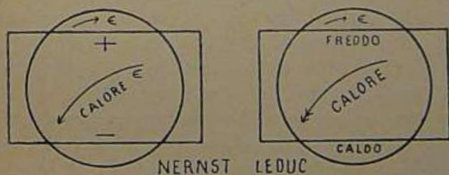



Fig. 33, *b*.

In una lastra attraversata da una corrente termica o da una corrente di elettroni, un campo magnetico aumenta la resistenza e la conduttività termica. Una deviazione della corrente termica da un lato è accompagnata da una carica negativa prodottasi in quello stesso lato.

I quattro effetti trasversali sono illustrati diagrammaticamente in fig. 33, in cui i circoli ac-

compagnati da freccie indicano la direzione di rivoluzione delle correnti degli elettroni che producono il campo magnetico e le freccie lunghe rappresentano le correnti elettriche o termiche.

L'effetto di Hall nel bismuto trova facile spiegazione. Gli elettroni costituenti la corrente si aprono la via attraverso le agglomerazioni degli atomi di bismuto e ovunque essi sono liberi di seguire la forza elettrica, corrono nella direzione della corrente elettrica, cioè da destra a sinistra. Ma mentre percorrono la loro libera corsa essi sono soggetti a deviazione per influenza della forza magnetica che le sospingerà verso l'orlo più basso della lastra e questo orlo acquista quindi una carica negativa. L'orlo superiore essendo sfuggito dagli elettroni acquista una carica positiva e quando i due orli vengono collegati mediante un filo conduttore, questo è percorso da una corrente piccola, ma costante.

Per comprendere gli effetti analoghi cagionati da una corrente termica bisogna ricordare che gli elettroni sono particelle capaci di trasportare l'energia cinetica e che essi sono quindi capaci di propagare il calore appunto come gli atomi più pesanti. In molte sostanze poi il calore produce una dissociazione degli atomi neutri, cosicchè un numero maggiore di elettroni viene posto in libertà e va errando indipendentemente. Vi è un numero maggiore di elettroni liberi nell'unità di volume del metallo caldo che nell'unità di volume dello stesso metallo freddo.

Per compensare questa differenza di densità

gli elettroni si diffondono dal metallo caldo al metallo freddo, dando così origine ad una corrente di elettroni che ha direzione eguale a quella della corrente termica.

L'effetto di Nernst si spiega in questo modo. Gli elettroni costituenti parte della corrente termica vengono deviati nella stessa direzione di quelli che trasportano la corrente elettrica e si accumulano sull'orlo inferiore della piastra, come detto sopra.

Non appena si produce la differenza di potenziale fra gli orli opposti, si forma una corrente trasversale per ristabilire l'equilibrio. Ma la rapidità con cui si produce il processo di egualizzazione dipende dallo spessore della piastra, e questa resistenza è più grande quanto più lo spessore è piccolo. È quindi ovvio che gli effetti di Hall e di Nernst sono inversamente proporzionali allo spessore della lastra, come detto sopra.

Gli effetti di Ettingshausen e di Leduc si spiegano in modo simile. Quantunque teoricamente siano effetti distinti, essi in pratica non vanno mai disgiunti dai due effetti precedenti. Gli effetti di Ettingshausen e di Hall si producono contemporaneamente quando l'orlo freddo è caricato positivamente e l'orlo caldo è caricato negativamente; gli effetti di Nernst e di Leduc sono in relazione consimile fra loro. I primi due sono detti effetti « galvano-magnetici » e gli ultimi due « effetti termo-magnetici ». Come sopra, l'egualizzazione di temperatura fra gli orli op-

posti dipende dalla entità della conduttività termica.

Effetti simili a questi sotto ogni rapporto, ma molto più deboli, sono prodotti dal carbonio e dal nichelio. Dei quattro effetti descritti, l'effetto di Hall fu il primo che si scoperse ed è pure quello che si può osservare più facilmente, non essendo necessarie alcune misurazioni di temperatura. Anche con piastre molto sottili e campi molto potenti la F. E. M. fra gli orli non eccede qualche milionesimo di un volt. Questa quantità può benissimo venire misurata cogli strumenti attuali. Essa è molto più grande nel bismuto, essendo 400 volte più grande che nel nichelio, che lo segue immediatamente nella scala di questi valori. Il valore più piccolo è quello dello stagno e del piombo.

L'effetto di Hall dipende da una differenza nella mobilità dei portatori positivi e negativi dell'elettricità e la sua esistenza nei metalli conferma la supposizione che la conduttività dei metalli sia formata in massima parte dagli elettroni. Nei liquidi si è cercata senza risultato la produzione di questo effetto, per due ragioni: Gli ioni nei liquidi sono molto più dispersi che nei metalli e le loro mobilità si equivalgono con grande approssimazione. Si può ritenere, a un dipresso, che nei metalli più comuni la mobilità dell'elettrone supera di 100 o 200 volte quella degli atomi positivi. Negli elettroliti nessun ione ha una mobilità dieci volte più grande di quella di un altro ione. È quindi evidente che

quel fisico italiano il quale si dedicò alla ricerca dell'effetto di Hall nei liquidi tentò scoprire la realizzazione di un fatto praticamente impossibile.,

Siccome gli elettroni liberi hanno una grande tendenza a condensare dell'acqua intorno ad essi ed a formare degli ioni negativi più pesanti, essi non agiscono come trasportatori nei liquidi. Nei gaz, per contro, gli atomi liberi sono presenti in gran numero e la conduttività dei gaz è rappresentata specialmente dagli elettroni e dagli atomi positivi. Quindi l'effetto di Hall si verifica in modo molto percettibile, specialmente nei gaz riscaldati, ove la ionizzazione si produce in larga misura. Così si dimostrò senza molta difficoltà la produzione dell'effetto di Hall nelle fiamme.

Effetti longitudinali. — Gli effetti longitudinali non vengono invertiti quando si rovescia il campo magnetico. Essi dipendono semplicemente dalle condizioni degli estremi della piastra e sono indipendenti dalla carica o dalla temperatura agli occhi della piastra.

Questi quattro effetti sono illustrati diagrammaticamente nella fig. 34. Le correnti degli elettroni vengono deviate nella direzione in cui le freccie sono incurvate e le correnti termiche vengono deviate nella stessa direzione quando gli elettroni si dirigono verso l'orlo più basso della piastra invece di dirigersi in linea retta verso l'orlo di sinistra, cosicchè quest'orlo della piastra avrà naturalmente una carica negativa

minore di prima. In fatto aumenterà il suo potenziale positivo ed essa diventerà relativamente più positiva dell'orlo destro della piastra, cioè la differenza originaria di potenziale risulterà aumentata. Lo stesso avverrebbe se la piastra venisse costruita più lunga o più sottile. Da ciò

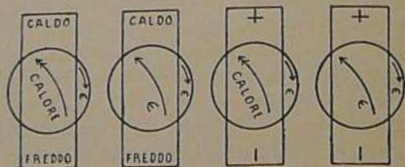



Fig. 34.

deriva l'effetto che il campo magnetico *aumenta la resistenza del bismuto*. Questo aumento in un campo di 10.000 unità ammonta fino a circa un terzo della resistenza primitiva. Questa proprietà è così costante e sicura che potè venire sfruttata per la misurazione della forza dei campi magnetici, richiedendosi perciò soltanto una sottile spirale di bismuto ed una scatola di resistenze.

La resistenza della spirale di bismuto indica la forza del campo magnetico nel luogo in cui essa viene collocata. Questo sistema di misurazione può venire applicato anche pei campi magnetici alternativi; però essi non debbono essere molto rapidi, altrimenti gli elettroni non avrebbero il tempo di essere deviati fuori del rego-

lare percorso e quindi la resistenza rimarrebbe invariata.

Il quarto effetto longitudinale è un aumento diretto della « resistenza termica » o una diminuzione della conduttività per il calore. L'estremo freddo della piastra diventa ancora più freddo non appena il magnete è eccitato. Esso cede all'acqua meno calore di quanto ne cedeva dianzi. Questo effetto è simile a quello che si produrrebbe se la piastra fosse stata allungata, ed è dovuto, come sopra, alla deviazione degli elettroni che costituiscono la maggior parte della corrente termica.

Gli altri due effetti sono effetti reciproci delle correnti di calore e di elettricità. La corrente termica consistendo in massima parte di elettroni, qualsiasi deviazione di essa implica una deviazione di elettricità (negativa) e ovunque si produce un accumulo di calore, ivi si produce pure un accumulo di elettroni, in altre parole un'elettrizzazione negativa.

Questi otto effetti possono venire riuniti in un solo diagramma (fig. 35), in cui le freccie mostrano la direzione e la deviazione di una corrente, che può essere tanto una corrente termica quanto una corrente di elettroni.

Effetti invertiti. — Dalle considerazioni sopra esposte appare evidente che la teoria degli elettroni applicata alla conduttività dei metalli è capace di spiegare le multiformi relazioni che si producono fra calore, elettricità e magnetismo, per quanto riguarda il bismuto. Ma in altri me-

talli gli effetti trasversali sono differenti e gli effetti longitudinali sono di regola troppo piccoli per essere osservati. Nell'antimonio, nel cobalto e nel tellurio gli effetti diretti (cioè quelli di Hall e di Leduc) sono rovesciati; nel ferro sono

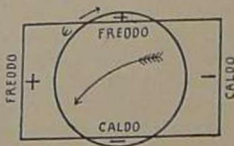



Fig. 35.

rovesciati tutti. Ciò significa che le leggi della conduttività nei metalli sono modificate da altre influenze. Gli effetti osservati nel cobalto sono troppo piccoli per poterne trarre alcuna conclusione; nell'antimonio e nel tellurio l'inversione dei due effetti indicati rivela in essi una struttura che collega questi metalli agli elementi non metallici. In essi probabilmente la dissociazione diretta in atomi positivi e in elettroni avviene in misura assai limitata e si avvicina di più alla dissociazione elettrolitica, in cui ciascun elettrone raduna intorno a sè degli atomi neutri per formare ioni più pesanti. L'elettrone, pesando allora di più, non ha alcun vantaggio di mobilità sugli ioni positivi, tanto che la sua mobilità può essere anche inferiore a quella di questi ioni. Il fatto che gli effetti reciproci si producono an-

cora, dimostra che il calore cagiona uno svolgimento di elettroni, come avviene nel bismuto.

Ciò non si verifica per il ferro, essendo noto che il calore non produce in questo metallo una evoluzione spontanea di elettroni. Sappiamo dalle pronunciate proprietà magnetiche del ferro che in esso le molecole sono pienamente libere di disporsi in qualsiasi direzione da esse scelta e che dispongono i loro assi magnetici in corrispondenza coll'asse del campo magnetico. Questo indica una grande indipendenza della materia ponderabile che costituisce il ferro e la sua tripla valenza indica che un solo atomo positivo può tenere uniti a sè parecchi elettroni. Può quindi accadere che la maggior parte degli elettroni sia collegata cogli atomi, mentre che un gran numero di atomi positivi erra liberamente, e quantunque essi non abbiano la grande mobilità degli elettroni, compensano questa deficienza colla superiorità del loro numero. Le stesse considerazioni valgono a spiegare l'inversione nel ferro del fenomeno di Thomson senza che sia necessario di ricorrere all'assunzione di elettroni positivi liberi, il che non è confermato da alcun altro fenomeno.

CAPITOLO XV.

Radio-attività.

Negli ultimi dieci anni si aggiunse un nuovo ramo alle scienze fisiche. I fenomeni della radio-attività sarebbero impossibili secondo l'antica teoria atomica, quantunque essi aggiungano nuove prove della struttura atomica della materia. Questi fenomeni sono, genericamente parlando, fenomeni elettrici, ma si oppongono recisamente alla supposizione, che venne pure formulata, che l'elettricità sia una forma di movimento. I fenomeni della radio-attività hanno confermato la struttura atomica della materia, ma hanno annientato il dogma dell'indistruttibilità dell'atomo. Essi crearono una nuova suddivisione nella scienza chimica aprendoci l'adito a penetrare negli intimi recessi dell'atomo stesso. Questi fenomeni condussero anche al riconoscimento della struttura atomica dell'elettricità sostituendo l'elettrone indivisibile e indistruttibile, all'atomo chimico og-

gidì non più considerato come indivisibile, nè come indistruttibile.

Questa è certamente una rivoluzione importantissima, tanto che gli ultimi anni del XIX secolo saranno perciò sempre memorabili.

Non è qui il luogo di avventurarsi nei particolari dei fenomeni presentati dalle sostanze radio-attive e io mi limiterò a citare quei fenomeni i quali si collegano più direttamente alla teoria degli elettroni.

Nel corso della mia rapida esposizione di fenomeni di elettricità e di magnetismo secondo la teoria degli elettroni, io ho accennato solo qua e là e incidentalmente alla radio-attività perchè preferii stabilire anzitutto la teoria in base ai fatti più famigliari allo studente. Io mi lusingo di essere riuscito a dimostrare che la teoria degli elettroni non soltanto spiega i fatti osservati meglio di tutte le teorie finora formulate, ma coordina tutti i vari fenomeni in modo non mai raggiunto prima d'ora, formando una base solida e proficua per ulteriori ricerche. Procedendo ora ad esaminare i fenomeni di radio-attività, vedremo come la teoria degli elettroni diventi sovrana, anzi indispensabile, e sembri accogliere in sè pressochè tutto il campo della fisica e l'intera chimica.

I corpi radio-attivi fino ad ora studiati sono l'uranio, il torio, il radio, l'attinio ed il polonio. Fra essi l'uranio ed il torio erano già noti ai chimici prima che fosse scoperta la radio-attività. Gli altri furono scoperti in conseguenza delle loro proprietà radio-attive.

La radio-attività — termine proposto dalla signora Curie, ora insegnante di Chimica all'Università di Parigi — consiste nell'emissione spontanea di raggi catodici, di raggi-canali e di raggi di Röntgen, cioè di elettroni, di atomi positivi o di pulsazioni eteree, ovvero di parecchie di queste emanazioni allo stesso tempo.

Gli « atomi positivi » emessi non sono tuttavia atomi della sostanza stessa, bensì atomi di una sostanza molto più leggiera, consistente di idrogeno o di elio, probabilmente di quest'ultimo. Questo è il fatto più sorprendente in tutta la serie di questi nuovi fenomeni. Un atomo chimico ben definito, avente uno spettro caratteristico proprio, si divide in due parti di cui una è l'atomo di un gaz che si trovò nel sole e nella terra, e l'altra una sostanza che si decompone ulteriormente producendo un numero maggiore di atomi di elio e di elettroni e finalmente forse trasformandosi in qualche altro " elemento „ conosciuto.

La sostanza che dà luogo al numero più grande di fenomeni di radio-attività ed ai fenomeni più ricchi di particolari è il radio, scoperto dai signori Curie nel 1898. Si suppone che esso « derivi » dall'uranio e che si riduca in piombo dopo sei mutazioni intermedie. Ciascuna mutazione richiede un tempo determinato per compiersi, per un dato peso della sostanza. Rutherford ebbe a dire (1): « Non vi può essere dubbio che gli elementi

(1) *Radio-activity*, E. RUTHERFORD. Cambridge, 1905.

« radio-attivi ci dànno lo spettacolo della tras-
« formazione spontanea della materia e che i di-
« versi prodotti che ne derivano segnano, per così
« dire, le varie tappe del processo di trasforma-
« zione in cui gli atomi sono liberi di esistere
« per un breve tempo prima di essere nuova-
« mente coinvolti in nuovi sistemi ».

Il radio è un metallo che si avvicina molto al bario nelle sue proprietà chimiche. Il suo peso atomico è 225 ed è superato soltanto da quello dei due elementi radio-attivi: l'uranio (240) ed il torio (232,5). Gli atomi del radio sono in equilibrio instabile; ma lo spezzarsi di un atomo avviene così di rado che un solo atomo per ogni diecimila milioni si spezza ad ogni secondo in un grammo di radio puro. Poichè un grammo di radio puro contiene circa 4×10^{21} atomi, ne risulta che in un grammo di radio puro si spezzano spontaneamente 4×10^{11} atomi ad ogni secondo. La divisione degli atomi produce la fuga di un atomo di elio caricato positivamente e animato da una velocità che in molti casi eguaglia quella della luce. Queste particelle cariche sono i raggi così detti α, la cui natura fu un enigma fino a che la loro deviazione prodotta da un magnete non fu chiaramente stabilita coll'uso di un campo molto forte. La proporzione fra gli atomi di radio presenti e il radio disaggregato è molto costante ed è affatto indipendente dal calore o da altri agenti fisici o chimici. Quanto più il radio è disaggregato, tanto più lentamente si disaggrega la quantità residua. Il valore della

disaggregazione, come pure l'intensità dei raggi α diminuisce secondo una legge esponenziale. Il modo più conveniente per misurare la stabilità di un corpo come il radio, si è quella di stabilire il tempo che un grammo di radio impiega per trasformare o disaggregare la metà dei suoi atomi. Questo tempo, T, è di 1300 anni nel caso del radio. Vediamo così che se una quantità di radio puro ha oggidì una determinata radio-attività, questa attività sarà ridotta alla metà nell'anno 3206. Nel frattempo che avverrà dei prodotti della disaggregazione?

Gli atomi dell'elio si diffondono nel gaz circostante e ne ionizzano le molecole nella collisione. Essi vengono arrestati in 3 cm. d'aria alla pressione atmosferica, ma non prima d'avere prodotto circa 86000 ioni per ciascun atomo di elio arrestato. Ora un bilione di atomi di elio non formano molto di questo elemento, certamente non costituiscono un volume misurabile. Ma questa quantità si potrebbe scoprire mediante lo spettroscopio quando fosse circa 100 milioni di volte più grande, il che richiederebbe circa 100 milioni di secondi, cioè quattro anni. L'elio fu effettivamente scoperto da Ramsay e Soddy nello spettro di un tubo contenente del radio, dopo un considerevole lasso di tempo. Inoltre l'elio si trova in tutti i minerali di radio in proporzione della quantità di radio presente, essendo ivi a poco a poco accumulato sin da quando si formò il radio.

Quello che rimane dell'atomo di radio, dopo

che se ne distaccò l'atomo di elio, forma un atomo di un gaz inerte, simile all'argon. Questo gaz emana dai minerali di radio e può venire raccolto da una corrente d'aria e condensato alla temperatura di — 150° C. È detto « l'emanazione del radio ». Il suo peso atomico è 221, quello dell'atomo di elio essendo 4 e quello del radio 225.

L'atomo dell'emanazione cede un'altra particella α di atomo di elio che va ad accrescere la quantità di elio svolta direttamente dal radio; il rimanente non è più un gaz, ma un solido che si deposita sulle pareti del recipiente ed è detto radio A di peso atomico 217.

Questo cambiamento è molto più rapido di quello del radio nella sua emanazione, la quale è molto meno stabile del radio stesso. Mentre che il radio impiega 1300 anni per ridursi della metà, lo stesso processo richiede 3,8 giorni per la sua emanazione.

Se quindi l'emanazione viene raccolta in un tubo separato, una metà di essa si precipita sulle pareti in 3,8 giorni con sviluppo di elio. Se ora l'elio e le emanazioni residue vengono allontanate da una corrente gassosa, noi otteniamo un deposito di radio A, sulle pareti del tubo, troppo piccolo per poter venire veduto o pesato, ma tuttavia scopribile per mezzo della sua radio-attività, poichè anche il radio A si decompone. Esso è solubile negli acidi forti i quali, tuttavia, non hanno influenza sulla sua disaggregazione. Esso si volatilizza a 1000° C ed anche qui non

muta il valore della sua riduzione. La disaggregazione è anche qui accompagnata da un'altra espulsione di atomi di elio — la terza — ed il residuo forma un altro deposito solido, detto radio B. Questa conversione è completa per la metà della sostanza in tre minuti ed è la più rapida delle trasformazioni del radio. Il radio B si volatilizza a 700° C e si disaggrega a sua volta trasformandosi della metà in 21 minuti. Questa trasformazione non è più accompagnata da alcuna espulsione e probabilmente è formata soltanto da un assestamento della materia nell'interno degli atomi.

Lo stadio susseguente è il radio C, altra sostanza solida che si volatilizza a 1000° C e compensa alla mancanza di raggi nel radio B emettendo per proprio conto non meno di tre qualità diverse di raggi. Ciascun atomo di radio C che si decompone espelle un atomo di elio ed un elettrone e dà luogo ad un'onda elettro-magnetica di raggi Röntgen. Il tempo della sua mezza trasformazione, T, è di 28 minuti. Il radio B fu scoperto soltanto a causa dell'irregolarità iniziale delle curve di riduzione del radio C. Questi tre prodotti, radio A, radio B e radio C, riuniti, formano il deposito attivo dovuto alle emanazioni del radio. Ma dopo la loro disaggregazione che, come abbiamo visto, non richiede molti minuti, essi dànno luogo a tre prodotti ulteriori, detti radio D, E e F rispettivamente, i quali formano insieme il deposito attivo « permanente ». T è eguale a 40 anni circa

nel caso del radio D e il prodotto risultante non dà raggi. T per il radio E è eguale a sei giorni. Esso non è volatile, ma emana elettroni e raggi Röntgen. Il prodotto finale è il radio F, il cui T è eguale a 143 giorni. Esso emana soltanto atomi di elio (raggi α) e si deposita sul bismuto da una soluzione. Questo radio F è un corpo immensamente interessante. Tutte le sue proprietà sono identiche a quelle di un altro corpo radioattivo scoperto indipendentemente dalla signora Curie e chiamato da lei « polonio » in onore della sua terra nativa, e trovato pure da Marckwald in Germania, che lo trovò associato col tellurio, denominandolo perciò « radio-tellurio ». Il merito di aver compiuto le lunghe e laboriose ricerche per tracciare, per così dire, l'albero genealogico del polonio spetta a Rutherford di Montreal. Ecco la serie completa:

Radio	emana atomi di elio
Emanazione	„ „ „
Radio A	„ „ „
Radio B	non emana raggi
Radio C	emana atomi di elio, elettroni e raggi x
Radio D	non emana raggi
Radio E	emana elettroni e raggi x
Radio F	„ atomi di elio
= polonio = radio = tellurio.	

Bisogna tener presente che tutte queste trasformazioni, eccetto lo sviluppo dell'elio, non si possono scoprire nè con mezzi chimici, nè con mezzi spettroscopici. Le sostanze si caratteriz-

zano soltanto per le loro radiazioni e per il modo in cui queste radiazioni si distinguono. Le radiazioni possono essere osservate in vari modi; il metodo più conveniente è quello della ionizzazione dell'aria cosicchè un elettroscopio sensibile viene scaricato. Stando a quello che conosciamo è lecito arguire che probabilmente avvengono trasformazioni molto più numerose, non soltanto nei corpi radio-attivi, ma nella materia ordinaria. I raggi α o atomi di elio cessano di produrre la ionizzazione quando la loro velocità raggiunge l'enorme valore di 10^9 cm. al secondo. Conseguentemente è possibile che tutta la materia si vada gradatamente disaggregando, ma non colla violenza esplosiva dei corpi radio-attivi e quindi non in modo percettibile. Molte indicazioni dimostrano che il polonio stesso si cambia eventualmente o in piombo o in bismuto.

L'uranio, il torio e l'attinio compiono un'odissea consimile, ma nel loro caso il primo prodotto che si forma non è un'emanazione bensì un solido. L'uranio dà luogo all' « uranio X »; non si conosce per ora altra trasformazione. L'uranio impiega circa 600 milioni di anni per trasformarsi della metà. Ciascun atomo che si disaggrega dà origine ad una particella α (atomo di elio) e lascia dietro di sè un atomo di una nuova sostanza che si disaggrega molto più facilmente. Questa nuova sostanza è quella che si chiama uranio X e fu per qualche tempo considerata come il solo costituente attivo dell'uranio. Rutherford descrive la sua scoperta colle parole seguenti :

« Gli esperimenti della signora Curie dimo-
« strano che la radio-attività dell'uranio e del
« radio è un fenomeno atomico. L'attività di
« qualsiasi composto di uranio dipende soltanto
« dalla quantità presente dell'elemento e come non
« è per nulla influenzata dalla sua combinazione
« chimica con altre sostanze, così non è influen-
« zata in modo apprezzabile dalle variazioni di
« temperatura. Parrebbe quindi probabile, poichè
« l'attività dell'uranio è una proprietà specifica
« dell'elemento, che essa non potrebbe essere
« separata dall'elemento stesso per effetto di
« agenti chimici. Nel 1900 tuttavia William Crookes
« dimostrò che, mediante una semplice opera-
« zione chimica, l'uranio poteva essere ottenuto
« inattivo fotograficamente, mentre che tutta la
« attività poteva essere concentrata in un pic-
« colo residuo privo di uranio. Questo residuo,
« a cui egli diede il nome di « Ur X » era cen-
« tinaia di volte più attivo fotograficamente, a
« parità di peso, dell'uranio da cui era stato se-
« parato. Il metodo impiegato per questa sepa-
« razione era quello di precipitare una soluzione
« di uranio mediante carbonato di ammonio.
« Sciogliendo il precipitato in un eccesso di re-
« agente rimaneva indisciolto un piccolo residuo
« che, filtrato, costituiva l'Ur X. La sostanza at-
« tiva Ur X era probabilmente presente in picco-
« lissima quantità, mescolata con impurità derivate
« dall'uranio. Nessuna linea nuova si produceva
« nello spettro. Una separazione parziale della
« attività dell'uranio fu pure effettuata con un

« altro metodo. Si sciolse nell'etere del nitrato
« di uranio cristallizzato e si trovò che l'uranio
« si divideva in frazioni disuguali fra l'etere e
« l'acqua presenti. La piccola porzione sciolta
« nello strato formato dall'acqua si trovò conte-
« nente praticamente tutta l'attività, esaminan-
« dola con un metodo fotografico, mentre l'altra
« porzione risultò pressochè inattiva. Questi ri-
« sultati, per loro stessi, spingono insistentemente
« alla conclusione che l'attività dell'uranio non
« è dovuta all'elemento stesso, ma a qualche
« altra sostanza associata con esso ed avente di-
« stinte proprietà chimiche.

« Risultati di carattere consimile vennero ot-
« tenuti da Becquerel. Egli trovò che il bario
« poteva essere reso fotograficamente molto at-
« tivo aggiungendo del clorito di bario ad una
« soluzione di uranio precipitandosi il bario in
« forma di solfato. Con un succedersi di preci-
« pitazioni ulteriori l'uranio veniva reso pressochè
« inattivo, mentre che il bario diventava ener-
« gicamente attivo.

« L'uranio inattivo e il bario attivo furono
« messi da parte ma esaminandoli un anno più
« tardi si trovò che l'uranio aveva riacquistata
« interamente la sua attività e che l'attività del
« bario era completamente sparita. La perdita di
« attività dell'uranio rivestiva quindi un carattere
« di temporaneità ».

La spiegazione ovvia di questo comportamento singolare si era quella che l'uranio sviluppa continuamente una qualche sostanza più attiva di sè

e che può esserne chimicamente separata. Questa nuova sostanza, Uranio X, si riduce alla metà in 22 giorni, invece che in centinaia di anni. L'uranio primitivo può venire identificato soltanto da una debole radio-attività consistente nell'espulsione degli atomi di elio.

Il torio e l'attinio dànno origine a prodotti simili detti torio X e attinio X rispettivamente. Da questi prodotti si sviluppa un gaz o emanazione sommamente instabile che richiede pochi secondi per ridursi della metà. L'emanazione del torio dà origine a due prodotti successivi di decomposizione, detti torio A e torio B. Essi formano un deposito sui corpi e sono concentrati al catodo di un campo elettrico. Il torio A è più volatile del torio B.

Infine, l'emanazione di attinio dà origine all'attinio A e all'attinio B i quali si depositano su corpi, si concentrano al catodo di un campo elettrico e sono solubili nell'ammonio e negli acidi forti, essi si volatilizzano al grado di ebullizione dell'acqua. L'attinio A può essere separato dall'attinio B mediante elettrolisi. Tanto il torio B quanto l'attinio B emettono tre specie di raggi mentre che i loro « parenti » non ne emettono di nessuna specie. Il periodo della loro vita si computa in minuti.

Questi sono tutti i corpi radio-attivi e i loro prodotti di disaggregazione fino ad ora conosciuti. L'elenco di essi verrà senza dubbio accresciuto probabilmente nel campo di corpi ben noti, come ad es. piombo, mercurio ed oro. Le

ricerche sono ora dirette a stabilire se si possano, oppure no, accelerare o ritardare i processi di disaggregazione con mezzi artificiali.

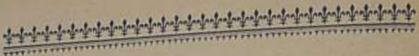
Questa domanda non ha facile risposta. L'effetto del calore non può produrre una accelerazione o un ritardo nella riduzione, ma può rendere più o meno evidente all'osservatore la presenza o l'assenza di una data sostanza per la differenza dei punti di fusione e di volatilizzazione. Il fatto che l'uranio possiede la stessa attività nell'aria liquida come alla temperatura ordinaria tende a dimostrare che l'attività risiede nell'atomo stesso. Il prof. Curie trovò anche che la luminosità del radio e il suo potere di eccitare la fluorescenza nei corpi persiste alla temperatura dell'aria liquida. Se si riscalda in un recipiente aperto un composto del radio, si trova che la sua attività, misurata dai raggi α, decresce del 25 $^0/_0$ circa del suo valore primitivo. Questo fatto viene spiegato dal Rutherford coll'attribuirlo non ad una mutazione nella radio-attività, ma alla liberazione dell'emanazione del radio che era contenuta nel radio. Se il radio viene invece riscaldato in un recipiente chiuso non si osserva alcuna alterazione, poichè nessuno dei prodotti radio-attivi può sfuggire.

Di tutte le sostanze radio-attive sopra indicate il radio possiede le proprietà più pronunciate; esso è due milioni di volte più attivo dell'uranio e pochi milligrammi sono sufficienti per produrre una efficace azione fotografica, per scaricare elettroscopi, per impartire una luminosità

brillante ad uno schermo fluorescente, per aver effetti deleterî sulla pelle degli animali. Tutti i composti del radio sono luminosi nell'oscurità, specialmente quando sono secchi. Una piccola quantità di esso dà luce bastante per poter leggere in una camera buia; questo esperimento non è tuttavia raccomandabile sotto nessun aspetto. Ma i suoi composti più luminosi non sono già i suoi sali più puri: una mescolanza col bario aumenta assai la luminosità che è una caratteristica fino ad oggi assai meno definita della radio-attività.

Una preparazione di radio, abitualmente formata da pochi milligrammi di bromito di radio collocato fra sottili lastrine di vetro, emette raggi α, raggi β (identici agli elettroni proiettati ed ai raggi catodici) e raggi così detti γ, o pulsazioni eteree, che non sono composti da particelle di nessuna specie. I raggi α, come sopra indicato, sono probabilmente atomi di elio, e quindi più voluminosi degli elettroni. Questi ultimi infatti hanno un potere di penetrazione centinaia di volte più grande di quelli e possono attraversare una foglia di alluminio dello spessore di un mezzo millimetro. Ma questo potere di penetrazione è superato di più di un centinaio di volte dai raggi γ, le più penetranti radiazioni conosciute, che possono attraversare 3 pollici di alluminio, e mezzo pollice di piombo.

Si comprende facilmente come queste tre specie di radiazioni vengano emesse simultaneamente dalla accennata preparazione di radio, se si considera questa preparazione come conte-

nente non solo il radio primitivo che lentamente sviluppa atomi di elio, ma anche le emanazioni dei depositi attivi, compreso il radio C, i quali dànno origine a tutte queste varie specie di raggi.

Queste tre specie di radiazioni sono facilmente separabili per mezzo di un forte campo magnetico. Se un sottile filo di radio viene disposto lungo le linee di forza in uno stretto truogolo orizzontale, i raggi γ vengono lanciati in linea retta verso l'alto, mentre invece i raggi β, essendo costituiti da elettroni, sono ripiegati su un lato e i raggi α vengono deviati di una quantità assai meno grande dalla parte opposta. Questi elettroni, lanciati lungo una linea che è ad angolo retto col truogolino, descrivono dei cerchi interi se sono liberi dei loro movimenti, ed è possibile di rivelarne la presenza mediante una pellicola fotografica in qualsiasi punto della circonferenza. Questo cammino degli elettroni proiettati dal radio può essere seguìto con grande precisione. Kaufmann riuscì a dimostrare la loro deviazione magnetica e elettrica simultaneamente, e potè per tal modo determinare il rapporto $\frac{e}{m}$ della carica alla massa. Questo valore risultò eguale a quelli dedotti dai raggi catodici e dall'effetto di Zeeman per lo stesso rapporto, ottenendosi così una prova efficacissima dell'importanza fondamentale e identità degli elettroni.

Un fenomeno notevole, osservato per primo dal Curie, è quello che il radio si mantiene co-

stantemente ad una temperatura di 3° circa sopra ai corpi circostanti. Questo calore è dovuto essenzialmente all'espulsione degli atomi di elio. Fu calcolato che 1 gr. di radio emette 100 grammo-calorie all'ora. Ciò significa che durante tutta la sua « vita » esso emetterebbe $1{,}6 \times 10^9$ grammo-calorie, o circa un milione di volte più energia a parità di peso di qualsiasi reazione chimica conosciuta fino ad ora. Questo fatto ci rende possibile di supporre la grandezza delle forze che potrebbero venire misurate quando si conoscesse il rapporto di disaggregazione degli atomi. Esso conferma ciò che dicemmo nei capitoli primi di questo libro riguardo alle enormi quantità di energia, che sono apprezzabili nella maggioranza dei fenomeni elettrici quando questi vengono trattati su una scala molecolare.

CAPITOLO XVI.

Costituzione dell'elettrone.

Abbiamo veduto che praticamente tutti i fenomeni di elettricità e di magnetismo possono venire spiegati ritenendo:

1° Che la corrente elettrica consiste nel movimento di particelle elettriche piccolissime dette elettroni, aventi una carica definita e costante, ed una massa definita che è pure costante, ma diventa più grande a velocità molto alte.

2° Che questi elettroni sono generalmente associati con atomi di materia ordinaria intorno ai quali essi descrivono orbite circolari o ellittiche, con periodi che si approssimano a quelli delle onde di luce visibili.

3° Che vi è una forza di attrazione fra gli atomi e gli elettroni che ad essi appartengono, la quale continua ad agire anche dopo avvenuta la separazione, ma diminuisce rapidamente col diminuire della distanza.

4° Che gli atomi privati dei loro elettroni si attraggono a vicenda.

5° Che gli elettroni si respingono reciprocamente.

6° Che gli elettroni semoventi lato a lato nell'etere si attraggono reciprocamente con una forza proporzionale alla loro velocità e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

7° Che una mutazione del momento dell'elettrone produce una mutazione nel momento in ciascuno degli altri elettroni e in direzione opposta.

Queste premesse e i loro corollari comprendono pressochè tutti i fatti esposti fin qui. Esse sono poco numerose — assai poco numerose se si pensa alla varietà enorme di fatti che comprendono — e certamente sono in numero minore dei capisaldi di una qualsiasi delle antiche teorie.

Ma l'intelletto umano non è mai soddisfatto quando è costretto ad ammettere *a priori* qualche affermazione, anche semplicissima.

Queste affermazioni devono essere « spiegate » anch'esse riducendole ad altre idee più famigliari e meno numerose. Una tale curiosità sarà giustificata solo fino a quando vi sarà qualche fenomeno di cui non si possa dare spiegazione. Ma se si trovasse che tutti i fatti sono spiegati in modo soddisfacente dalle premesse della teoria degli elettroni, allora la scienza dell'elettricità sarebbe completa e qualsiasi ricerca ulte-

riore sulle cause e sulla attendibilità delle premesse fondamentali non potrebbe nulla aggiungere alla scienza.

Si potrebbero bensì accrescere le nostre cognizioni ma queste nuove cognizioni formerebbero l'oggetto di una nuova scienza, il che è reso evidente da un confronto coll'astronomia matematica. Tutti i suoi fenomeni si spiegano colla legge della gravitazione scoperta dal Newton, la quale stabilisce che due corpi celesti si attraggono reciprocamente con forza proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa.

Ricerche ulteriori sulla natura della forza di gravitazione non amplierebbero l'astronomia matematica nè ci renderebbero capaci di predire gli avvenimenti astronomici con maggiore esattezza che per il passato.

Se però la legge della gravitazione risultasse suscettibile di eccezioni, la teoria che su essa si fondò, dovrebbe essere senz'altro respinta, il che non significherebbe una retrogressione, ma un nuovo passo verso la scoperta di nuove e più generali verità.

Come ben dice J. J. Thomson, l'elettrone è ora meglio conosciuto dell'atomo. È quindi presumibile che fra breve si costituirà una teoria dell'atomo chimico basata sugli elettroni. Una tale teoría è resa necessaria dai fenomeni di radio-attività in cui gli atomi risultano emettere elettroni e particelle positive.

Questi elettroni e queste particelle positive

devono quindi aver formato parte costituente dell'atomo.

L'atomo, coi suoi elettroni separabili, è stato talvolta paragonato al sistema solare.

L'analogia è però assai limitata e non merita di essere accennata che a scopo di sussidiare la memoria e l'immaginazione.

Considerando il sistema solare come un atomo ingrandito, il sole rappresenterebbe il nucleo positivo ed i pianeti gli elettroni.

Attualmente si conosce che il sole ha una carica positiva e la terra una carica negativa.

Ma queste cariche sono relativamente infinitesimali e non influenzano in modo percettibile le forze agenti fra essi: in questo punto quindi fallisce l'analogia. D'altra parte i rapporti delle masse vengono utilmente messi a confronto: la massa di Giove è circa $\frac{1}{1000}$ di quella del sole ed è paragonabile alla massa dell'elettrone in relazione coll'atomo di idrogeno. La massa della terra è $\frac{1}{324.000}$ di quella del sole e questo rapporto è pressochè identico a quello di un elettrone all'atomo dei metalli pesanti. Possiamo dire quindi che nel sistema solare abbiamo esempi di diversi rapporti delle masse come nel caso dell'elettrone relativamente al nucleo positivo, quantunque nel caso degli atomi sono questi che presentano variazioni nella massa e non gli elettroni.

Il sistema solare può essere considerato come

una molecola magnetica. La carica della terra è per lo meno eguale a 25 milioni di coulombs o « armate » di elettroni. Questa carica passa intorno al sole una volta all'anno, cosicchè la corrente rappresentata dal movimento della terra è di 25 milioni di coulombs all'anno, ossia circa di 1 ampère (0,1 di unità elettro-magnetica di corrente). Il momento magnetico (v. p. 183) del sistema sole-terra può essere ottenuto moltiplicando la corrente per l'area intorno a cui essa circola. L'area dell'orbita della terra è di circa 10^{27} cm.^{2} cosicchè il movimento magnetico del sistema sole-terra risulta 10^{26} unità c. g. s. Questo momento è troppo piccolo per esercitare effetti apprezzabili fuori del sistema solare, e tanto meno per avere influenza sull'orientazione delle orbite planetarie di altre stelle. Vediamo quindi, come detto sopra, che le forze magnetiche e elettriche non hanno parte apprezzabile nel movimento dei corpi celesti

Può anche darsi che la carica elettrica positiva del sole controbilanci le cariche negative dei pianeti nel qual caso il sistema solare verrebbe a rappresentare un atomo neutro. Se, in queste circostanze, un altro sistema solare, parimenti neutro, si avvicinasse al nostro in modo da strappare Nettuno alla dipendenza del nostro proprio sistema, noi avremmo un esempio della combinazione di due atomi e quindi della loro separazione con cariche contrarie, il nostro sistema solare risultando caricato positivamente e l'altro sistema caricato negativamente, avendo

catturato un elettrone « Nettuno ». Così potremmo rappresentare lo svolgersi del procedimento che avviene fra un atomo di mercurio e un atomo di cloro.

In realtà non pare che i sistemi solari dell'universo visibile si avvicinino mai tanto fra loro da intersecare le orbite dei loro pianeti.

L'universo visibile è quindi paragonabile a un gaz piuttosto che a un liquido o a un solido eccetto nella porzione detta la Via Lattea che appare come avente una consistenza tale da darle un'apparenza di metallo se potesse essere ridotta a dimensioni accessibili ai sensi.

Il numero delle stelle visibili ammonta a mille milioni. Ora il più piccolo oggetto esaminato al microscopio contiene, per lo meno, cento milioni di atomi. Possiamo quindi ritenere come dimostrato che l'universo visibile, il cui limite esterno è la Via Lattea, se fosse ridotto nelle stesse proporzioni del rapporto fra la terra e un elettrone rassomiglierebbe molto a un corpuscolo del sangue umano e conterrebbe pressochè lo stesso numero di atomi.

I corpuscoli del sangue sono troppo piccoli per poterne osservare le proprietà magnetiche ed elettriche, tanto meno poi per esaminare le proprietà degli atomi e degli elettroni che li compongono. Si dovrebbero radunare molti universi ed allora i risultati sarebbero valori medii. Se potessimo immaginare un gigante immenso capace di tentare la misurazione delle masse, velocità e cariche elettriche delle stelle e dei

pianeti — che egli chiamerebbe col nome di « atomi » ed « elettroni » — egli potrebbe benissimo trovare lo stesso valore medio per ciascun milione di essi, scelto a caso. Egli potrebbe trovare che il rapporto della carica alla massa di ciascun pianeta separabile è costante, e che la carica di ciascun pianeta si approssima ad un valore fisso, nei limiti dei suoi mezzi di misura. Egli naturalmente arriverebbe alla stessa conclusione che noi troviamo per gli elettroni; cioè che essi sono assolutamente costanti ed eguali fra loro, e costituiscono l'unità fisica ed il veicolo dell'elettricità.

Oltre a ciò il nostro gigante potrebbe pure riuscire a classificare i vari sistemi solari in relazione alle loro masse e a stabilire determinate affinità « chimiche » fra i sistemi di massa differente. Egli potrebbe trovare che le masse, che egli chiamerebbe i « pesi atomici », presentano una costante, e influenzano in modo determinato l'affinità e le caratteristiche chimiche; riuscendo per tal modo a scoprire una « legge periodica » su larga scala. Egli potrebbe, mediante la compressione o con trattamenti chimici, avvicinare fra loro i sistemi solari portando un certo numero di pianeti a errare liberamente fra le stelle fisse. Avrebbe così costruito un « conduttore ». Finalmente egli riuscirebbe forse a far ruotare le orbite dei vari sistemi solari in uno stesso piano, il che produrrebbe un « magnete » di potenza enorme.

Vediamo così come un grande numero di con-

getture riguardo alla fisica molecolare possa essere ricavato dall'esame dei fenomeni astronomici che si producono in più larga scala.

La scala a cui dovremmo ridurre l'universo visibile per portarlo a dimensioni microscopiche è di 10^{22} a 1. Il raggio del sistema solare è in cifra tonda di 10^{14} cm. che diviso per 10^{22} dà 10^{8} cm., raggio dell'atomo.

Nettuno, uno dei pianeti più facilmente « separabili » del nostro sistema, può essere paragonato ad un elettrone distaccabile.

Il suo raggio è di 10^{9} cm. all'incirca, e riducendo questo valore con la stessa proporzione si ottiene 10^{-13} cm. per il raggio dell'elettrone. La massa di Nettuno sta al sistema solare press'a poco nello stesso rapporto dell'elettrone all'atomo di litio o di ossigeno, cosicchè in questo caso l'analogia persiste. La distanza fra il sole e la stella fissa più vicina è di circa 10^{18} cm. che diviso per 10^{22} diventa 10^{-4} cm. o 0,001 mm. che è il percorso libero medio di una molecola d'aria su di un'alta montagna.

Se, oltre a ridurre le dimensioni lineari da 10^{22} a 1, supponiamo di mantenere invariate le velocità attuali dei corpi celesti, osserviamo risultati molto interessanti e suggestivi.

Poichè Nettuno richiede circa 220 anni per compiere un giro intorno al sole, la sua « frequenza » di rivoluzione (ossia il numero di rivoluzioni al secondo) è di $1,5 \times 10^{-10}$. Poichè il percorso è ridotto di 10^{22}, la frequenza verrà aumentata in eguale proporzione e diventerà

$1,5 \times 10^{12}$. Questa è la frequenza di certe onde di luce infra-rossa. La frequenza del pianeta Mercurio diverrà $1,25 \times 10^{15}$, valore che è compreso nelle onde di luce ultra-violetta.

Tutti gli altri pianeti produrranno linee spettrali intermedie fra queste — cioè comprese nello spettro visibile. Gli asteroidi produrranno una larga striscia invece che una linea e vi saranno delle linee extra dovute alle perturbazioni reciproche dei pianeti. *Il sistema solare presenterebbe quindi uno spettro molto simile a quello di un elemento chimico.*

È questo uno stupefacente esempio dell'analogia fra un atomo ed un sistema planetario.

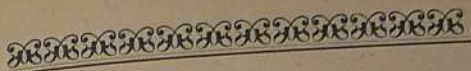
Possiamo naturalmente invertire il processo partendo dal mondo lillipuziano degli atomi e degli elettroni e ingrandendolo di 10^{22}, lasciandone invariate le velocità.

Un atomo, per es., di ossigeno assumerebbe le dimensioni del sistema solare ed i suoi due elettroni separabili assomiglierebbero con approssimazione assai grande a Urano e a Nettuno per quanto si riferisce alle dimensioni, alla distanza dal sole ed al periodo di rivoluzione. Uno degli elettroni più strettamente uniti all'atomo, attivo nei fenomeni di magnetismo e di radiazione ma non in quelli di conduttività, potrebbe essere paragonato alla terra, per le distanze dal sole e potrebbe girare intorno all'atomo nell'anno sidereo. Naturalmente supponiamo che l'elettrone, ingrandito fino alle dimensioni della terra, rivesta la forma di una

sfera perfettamente liscia; per lo meno così siamo abituati a trovarlo descritto. Ma una tale sfera, in realtà, è assolutamente inconcepibile, e neppure è necessario immaginarla così, poichè un elettrone può bensì avere struttura simile a quella della terra, in ogni suo particolare, sempre che si produca mutazione nelle sue proprietà elettriche o astronomiche, ma il fatto che esso abbia o no tale struttura rimarrà sempre a noi ignorato, considerando la serie dei fenomeni accessibile ai nostri sensi. Possiamo quindi, senza per nulla pregiudicare la primitiva concezione dell'elettrone come veicolo universale delle manifestazioni elettriche, immaginarlo come un vero microcosmo, un mondo in cui la vita non può differire molto dalla vita come si esplica sulla nostra terra. Invero considerando che per tale mondo lo spazio ed il tempo si ridurrebbero nella stessa proporzione costante ed uniforme, è dubbio se gli strumenti attuali, trasformati subitaneamente, potrebbero indicare il prodursi di un qualche cambiamento fondamentale. È questa un'altra illustrazione del principio notissimo che dimensioni di grandezze e spazio di tempo sono misure relative dipendenti dal paragone colle unità di misura. Se tutte le quantità, incluse le unità di misura, venissero ridotte nella stessa proporzione, o se tutte le cose subissero un'eguale accelerazione o un eguale ritardo, noi non ci avvedremmo menomamente che si sia prodotto alcun cambiamento.

D'altra parte, se un essere intelligente potesse

trasferirsi dal detto microcosmo al nostro mondo attuale e potesse mantenere tuttavia una qualche relazione col suo mondo antico, la sua fugace esistenza fra noi apparirebbe agli abitanti del microcosmo come un'eternità immutabile poichè qualunque cambiamento misurabile da essi richiederebbe milioni di anni per compiersi.

Entriamo qui nel campo della speculazione pura e non può essere funzione di un'opera scientifica trattare problemi occulti di questa specie. Ma poichè la teoria degli elettroni promette di guidarci nei misteri della materia più oltre di quanto fu fino ad ora tentato, è necessario discutere il prospetto generale per quanto brevemente. Concludendo nella analogia suggestiva e proficua dell'astronomia e della chimica si presenta a noi una veduta illimitata comprendente mondi entro mondi, spettacolo magnifico, se pure immaginario, il quale, impedendoci di porre alcun limite alla molteplicità dei fenomeni possibili, ci conforta tuttavia colla riflessione che per quanto si riferisce ai nostri sensi, la molteplicità dei fenomeni ha un limite assoluto, il che rende possibile di prevedere la formulazione eventuale di una teoria che abbracci tutti i fenomeni che possono cadere nel dominio dei nostri sensi.

CAPITOLO XVII.

Valori di quantità elettriche.

La scoperta che l'elettricità ha una struttura atomica e che i trasportatori di essa sono costituiti da particelle rende desiderabile di rifondere il nostro sistema di misure in base a rinnovellate unità.

Infatti vediamo che l'elettricità diventa così fondamentale come la massa e forse più ancora poichè tutte le indicazioni tendono a dimostrare sempre più il vantaggio che si ricaverebbe dal riconoscere l'elettricità come una quantità naturale fondamentale.

Le altre quantità fondamentali, fino ad ora riconosciute, sono la lunghezza, la massa e il tempo. Esse si dicono « quantità fondamentali » perchè mentre nessuna di queste quantità può essere misurata dalle altre, esse sono capaci di misurare altre quantità più complesse. Così, ad esempio, non è necessaria un'unità fondamentale per la velocità. La misuriamo infatti mediante

le unità di spazio e di tempo avendo: tanti centimetri al secondo, o tante miglia all'ora. Nemmeno è necessario adottare un'unità fondamentale distinta per misurare il lavoro, il quale può venire espresso in chilogrammetri o cavalli-vapore-ora. Nulla ci impedisce di adottare un'unità speciale per misurarlo, com'è l'erg., ma questa non è un'unità fondamentale potendo essere ridotta nelle unità di massa, di spazio e di tempo.

Una formula che esprime il modo in cui queste tre unità fondamentali entrano a comporre le unità derivate dicesi una formula « dimensionale ». Le formole di questo genere sono molto utili perchè ci dànno l'analisi della struttura di una quantità fisica, così come le formole chimiche ci rivelano la struttura delle molecole chimiche. Esse sono ancora utili per la conversione delle quantità da un sistema di misura all'altro.

Le quantità fondamentali: massa, lunghezza e tempo, vengono indicate coi simboli M, L e T rispettivamente.

Di esse L è la più fondamentale poichè M e T si misurano sovente come lunghezze riferite alle dimensioni della terra; T in rapporto al tempo della rotazione della terra intorno al suo asse; M si riferisce a L e T per la convenzione che l'unità di massa è la massa d'acqua contenuta in un centimetro cubo al massimo di densità. Vediamo così che le dimensioni e la rotazione della terra ci dànno le unità di riferimento per lo spazio e pel tempo e che una

speciale sostanza chimica — l'acqua — ci dà l'unità per la massa. Ciò è una riprova della minore importanza della massa come unità fondamentale.

La misurazione di una superfice richiede due misurazioni indipendenti della lunghezza, il risultato essendo il prodotto di questi due valori. Indicando con L ciascuna di queste due misure il risultato di misurazione di un'area può venire indicato con L^2 e quello di un volume con L^3.

L'ultima formola indica ancora che quando la scala lineare viene alterata di un certo valore, il risultato numerico risulterà alterato in ragione della terza potenza di quel valore, poichè tre diversi risultati di misurazioni separate delle lunghezze sono modificate allo stesso modo.

Il misurare una velocità implica la misura simultanea di una lunghezza e di uno spazio di tempo. La velocità aumenta colla lunghezza e diminuisce col tempo impiegato a percorrerla.

La formola dimensionale per la velocità sarà quindi $\frac{L}{T}$ (ossia, come viene scritta più comunemente: LT^{-1}).

Nel misurare un'accelerazione noi misuriamo la velocità acquistata in un certo tempo.

Vi sono quindi due misure indipendenti di tempo implicate in una sola determinazione, e la formola dimensionale diventa LT^{-2}.

La forza si misura considerando la massa spostata e la velocità che essa acquista nell'unità di tempo. La sua formola dimensionale è MLT^{-2}.

Il lavoro o l'energia, misurato dal prodotto della forza per la distanza, è rappresentato da ML^2T^{-2}, e così via.

Qualcuno propose di eliminare M dai calcoli delle dimensioni riducendolo a espressioni di L e T, queste essendo unità più fondamentali. Si otterrà questo scopo quando si formi un'equazione in cui M venga sostituita in termini contenenti soltanto L e T. Perciò dobbiamo scoprire un'altra proprietà permanente e universale della massa oltre a quella che essa acquista sempre: la stessa velocità per l'influenza di un determinato impulso. Se, p. es., tutti i corpi avessero densità eguale, la massa si confonderebbe col volume e la sua formola sarebbe L^3. Ma questo non è certamente il caso. Vi è però un'altra proprietà della massa, scoperta dal Newton, ed è che la forza di attrazione fra due masse è direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa.

Questa forza può quindi essere espressa con la formola $\frac{MM}{L^2}$ ossia M^2L^{-2}.

La forza, come detto sopra, ha la formola dimensionale MLT^{-2}. Abbiamo quindi

$$MLT^{-2} = M^2L^{-2}$$

che non può essere un'eguaglianza esatta a meno che: (*a*) si trascuri qualche altra quantità come ad esempio, la densità dell'etere, ovvero (*b*) che la massa si possa esprimere in termini composti

di L e di T. Ciò perchè è ovvio che le formole dimensionali devono essere le stesse a destra ed a sinistra del segno di eguaglianza. Non potremo mai paragonare una lunghezza con uno spazio di tempo, poichè queste sono due quantità essenzialmente differenti. Sarebbe come se si dicesse, puta caso: tre cavalli eguale a tre cani. Scegliendo l'ipotesi (*b*) e dividendo ambo i membri dell'equazione per M otteniamo:

$$LT^{-2} = ML^{-2}$$

ossia

$$M = L^3T^{-2}$$

che può essere considerato come il prodotto di una lunghezza per il quadrato di una velocità. Tuttavia, poichè fino ad ora siamo nell'ignoranza assoluta del significato di questa velocità e di questa lunghezza, il vantaggio ricavato dalla fatta sostituzione è irrisorio.

Potremmo, è vero, misurare le masse di molti proiettili di eguali dimensioni dalla profondità da essi raggiunta in uno schermo di legno quando vengono lanciati con una velocità determinata, ma questo nuovo metodo sarebbe assai grossolano in paragone degli attuali metodi basati sul peso dei corpi. Inoltre il mettere da parte la quantità M significherebbe la perdita di una concezione fisica definita ed utile la quale colpisce direttamente il nostro senso muscolare.

Ora tutti i citati argomenti in favore del mantenimento della quantità fondamentale « massa »

militano pure in favore del riconoscimento della quantità « elettrica » come quantità fondamentale; essa possiede infatti una unità naturale: l'elettrone, più universale e più predominante delle altre.

Una quantità elettrica può essere misurata partendo da una qualsiasi delle numerose serie di fenomeni in cui l'ammontare di essa che trovasi presente ha parte decisiva.

Abbiamo già descritto i due sistemi principali per misurare l'elettricità, uno dei quali derivato dalla ripulsione elettrostatica (p. 41) e l'altro dall' elettrodinamica o forza magnetica (p. 162). A questi due si possono aggiungere il sistema chimico che permette una più grande accuratezza nell'applicazione, quantunque esso venga basato abitualmente sul sistema elettromagnetico. Il sistema elettrostatico deriva le sue unità di elettricità dalla ripulsione di due quantità dello stesso segno collocate all'unità di distanza. Questo equivale a dedurre l'unità di massa dalla sua attrazione di gravità. L'equazione è:

$$MLT^{-2} = E^2L^{-2}$$

in cui E è la quantità di elettricità. Se vogliamo sostituire per E i valori M, L e T, dobbiamo risolvere questa equazione rispetto a E. Otteniamo:

$$E^2 = ML^3T^{-2}$$

e

$$E = M^{\frac{1}{2}} L^{\frac{3}{2}} T^{-1}$$

Questa formola dimensionale per E è assai complicata e la sua interpretazione è resa difficile a cagione dell'esponente frazionario di M che pare irrazionale, e anche adottandola noi non conosciamo quali proprietà del mezzo noi trascuriamo nel calcolo. Inoltre noi possiamo ottenere per L una diversa formola dimensionale se la deduciamo da qualche altra proprietà, come la forza magnetica. È quindi maggiormente consigliabile di considerare la quantità elettrica come una quantità fondamentale e di riferirla all'elettrone come alla sua unità, oppure a qualunque dei suoi effetti suscettibili di misurazione. Facendo così noi otteniamo un sistema uniforme, semplice e razionale di formole dimensionali come si può vedere da quanto segue:

Le unità fondamentali sono M, massa, L, lunghezza, T, tempo e E, elettricità.

Ne otteniamo le formole dimensionali:

Quantità elettrica E.

Densità superficiale elettrica, ossia quantità di elettricità per cm.², EL^{-2}.

Corrente elettrica, o quantità di elettricità che attraversa in un secondo una data superfice, ET^{-1}.

Densità di corrente, o corrente per cm.² di sezione attraverso al conduttore $ET^{-1}L^{-2}$.

Forza elettrica, la stessa formola per la forza MLT^{-2}.

Campo elettrostatico o forza esercitata sulla unità elettrica di quantità $MLT^{-2}E^{-1}$.

Potenziale elettrico, lavoro eseguito sull'unità di quantità, $ML^2T^{-2}E^{-1}$.

Costante dielettrica, o densità degli elettroni $\times$ (spostamento nell'unità di campo)

$$E^2M^{-1}L^{-3}T^2.$$

Resistenza per la legge di Ohm FEM $\div$ corrente, $ML^2T^{-1}E^{-2}$.

Resistenza specifica, resistenza di 1 cm³

$$ML^3T^{-1}L^{-2}.$$

Conduttività (specifica) inverso della resistenza specifica $M^{-1}L^{-3}TE^2$.

Quest'ultima è suscettibile di una semplice interpretazione in base alla teoria degli elettroni (v. pag. 118). Possiamo scriverla come segue:

$$\frac{E}{L^3} \cdot \frac{L}{T} \cdot \frac{E}{MLT^{-2}}$$

ossia

(elettroni per c³) $\times$ (velocità degli elettroni)

$$\times\left(\frac{1}{\text{campo}}\right).$$

Cioè la conduttività specifica è misurata dal numero di elettroni liberi per cm³ moltiplicato per la velocità uniforme che ogni elettrone libero acquista nell'unità di campo.

Otteniamo ancora le seguenti formole magnetiche:

Momento magnetico, corrente moltiplicata per l'area intorno a cui essa circola $ET^{-1}L^2$.

Energia magnetica polare o momento magnetico per unità di lunghezza $ET^{-1}L$.

Forza magnetica, come per la forza.

Potenziale magnetico, lavoro per il polo magnetico unitario $M^{-1}LT^{-1}E^{-1}$.

Campo magnetico, forza per unità di polo magnetico $E^{-1} M T^{-1}$.

Intensità di magnetizzazione, momento magnetico per l'unità di volume, $E T^{-1} L^{-1}$, il che significa la corrente circolante intorno all'unità di lunghezza del magnete.

Energia di un involucro magnetico o corrente circolante intorno ad esso $E T^{-1}$ (corrente che circola intorno ad esso).

Flusso magnetico, campo moltiplicato per l'area $E^{-1} M T^{-1} L^2$.

Suscettibilità magnetica o intensità di magnetizzazione acquistata nell'unità del campo, $E^2 M^{-1} L^{-1}$.

Finalmente l'*induttività* o coefficiente di autoinduzione essendo la FEM indotta in un circuito dall'unità di carica per una corrente al secondo, otteniamo

$$M L^2 T^{-2} E^{-1} \div \frac{E T^{-1}}{T}$$

ossia

$$M L^2 E^{-2}.$$

Le formole dimensionali sopra riportate dimostrano a primo aspetto la struttura e la derivazione delle varie quantità elettriche e magnetiche e la loro correlazione coll'unità di elettricità.

Unità pratiche. L'unità naturale dell'elettricità è l'elettrone. Ma esso è così straordinariamente piccolo che in pratica sarebbe necessaria l'ado-

zione di un suo multiplo, per es., un trilione di elettroni o 0,112 coulombs, sufficienti per far passare 0,126 milligrammi di argento attraverso una cellula elettrolitica. Ciò è tuttavia impossibile presentemente poichè la carica di un elettrone non è nota con esattezza sufficiente. In ogni caso non sarebbe consigliabile di sconvolgere tutta la pratica elettrotecnica coll'adozione di altre unità, a meno che non si realizzino per tal modo importanti vantaggi. L'unità pratica dell'elettricità è il coulomb che contiene 8,79 trilioni di elettroni.

Questa unità I, io ho qualche volta indicato con l'espressione « un'armata di elettroni » non per voler escludere la parola coulomb ma per aiutare l'esposizione figurativa della struttura atomica dell'elettricità ed anche per distinguerla dall'unità elettrostatica molto più piccola o « compagnia » (v. pag. 42). Il rapporto per queste due unità è 3×10^{10} ossia la cifra che rappresenta la velocità della luce. L'attrazione magnetica fra due elettroni che corrono per l'etere lato a lato controbilancia esattamente la loro ripulsione elettrostatica, quando la velocità raggiunge questa cifra.

L'unità pratica per l'intensità di corrente è l'*ampère* consistente nel passaggio di un coulomb al secondo attraverso a una qualsiasi sezione trasversale del conduttore.

Se una corrente di un ampère viene mandata attraverso una cellula elettrolitica o voltametro composto da elettrodi di argento immersi in una soluzione di nitrato d'argento, la corrente depo-

sita 1,118 milligrammi d'argento al secondo. Questa è la definizione ufficiale dell'intensità di corrente. Si può anche giungere ad essa in base all'attrazione magnetica (v. pag. 168), anzi appunto in questo modo venne stabilita originariamente l'unità di corrente. Ma l'unità « elettro-magnetica » di corrente è dieci volte più grande del valore di un ampère.

L'unità che segue immediatamente per la sua importanza è quella della differenza di potenziale. Il trasporto di una quantità di elettricità da un punto di basso potenziale a un punto di alto potenziale richiede un certo lavoro: questo lavoro per l'unità di quantità misura la differenza di potenziale fra questi due punti. Possiamo dire che esiste l'unità di differenza di potenziale fra due punti quando si richiede un « erg » di lavoro per trasportare da uno all'altro una « compagnia », o unità elettrostatica di elettroni. Questa è l'unità elettrostatica della differenza di potenziale. L'unità pratica è il volt che ne è la $\frac{1}{300}$ parte.

Il trasporto di un coulomb per una differenza di potenziale di un volt richiede un lavoro di 10 milioni di ergon, quantità che fu denominata un « joule » da Joule, lo scopritore della legge del riscaldamento per i fili percorsi da corrente.

Inversamente se un coulomb cade per un volt se ne può ricavare il lavoro di un joule. Generalmente esso è rappresentato dal calore che si sviluppa nel filo, generato dai successivi arresti degli elettroni.

Il modo più ovvio per definire la conduttività sarebbe quello di attribuire l'unità di conduttività a una sostanza contenente un elettrone libero per ogni cm^3, capace di acquistare una velocità uniforme di un cm. al secondo per l'influenza di un campo di un volt per cm., o di convenire che in tale campo un elettrone al secondo dovrebbe passare attraverso a ogni cm^2 di sezione trasversale. Ma in pratica la conduttività si deduce dalla resistenza e questa si deduce dalla corrente e dal voltaggio. Un conduttore ha l'unità di resistenza di un ohm quando la corrente di un ampère lo percorre, quando si crea ai suoi estremi una differenza di potenziale pari a un volt.

Il lavoro eseguito da una corrente si misura in joules. La « potenza » di lavoro è misurata dal prodotto della corrente per il voltaggio, e l'unità ne è il watt, che è un joule al secondo. Molti elettricisti tecnici misurano il lavoro in watt-secondi o chilowatt-ore piuttosto che in joules. Una chilowatt-ora è 3.600.000 joules, ossia $3{,}6 \times 10^{13}$ ergon.

Si è già detto (pag. 184) che l'unità di polo magnetico è posseduta da un lungo e sottile magnete di area sezionale di 1 cm^2 se la corrente che lo circonda aumenta a un'unità elettro-magnetica (= 10 ampères) per ogni cm. di lunghezza. In questo caso l'unità pratica (l'ampère) non è adottata, e lo stesso si può dire per le altre quantità magnetiche che originariamente si basavano sulla ripulsione fra due poli magnetici

simili. Fra esse le più importanti sono: il momento magnetico (lunghezza moltiplicata per l'intensità del polo) il campo magnetico (forza per unità di polo) l'intensità di magnetizzazione (momento magnetico per unità di volume) e la suscettibilità magnetica (magnetizzazione nell'unità di campo). La « permeabilità » magnetica è il campo totale esistente nell'interno di una sostanza quando questa viene introdotta nell'unità di campo. Essa si misura con $1 + 4\pi K$ ove K è la suscettibilità magnetica.

L'« induzione » B è il prodotto della permeabilità per l'intensità del campo. Essa rappresenta il campo magnetico interno proprio della sostanza.

Questa « induzione magnetica » deve essere distinta con cura dalla induzione elettro-magnetica che dà origine a correnti indotte, e anche dall'induzione elettrostatica o « influenza » che dà origine alle cariche nei corpi quando questi vengono portati in un campo elettrico. È da deplorarsi per l'esattezza scientifica che un solo vocabolo abbia assunto tre significati differenti.

Quando una corrente che percorre un conduttore, varia, l'inerzia degli elettroni in movimento dovuta al loro proprio movimento o alla reazione degli elettroni circostanti, rappresenta un accumulo di energia che viene consumata nel resistere a questa variazione; tale accumulo di energia per ogni quantità unitaria in movimento può essere espressa in volts. Quando una corrente diminuisce o aumenta nel rapporto di un ampère al secondo, e la F.E.M così

indotta nel circuito è di un volt, si dice che il conduttore ha l'unità di induttività la quale unità è detta un *henry*. Essa è 10^9 volte più grande dell'unità derivata dalla considerazione teorica della F.E.M. indotta in un conduttore attraversato dalle linee di forza, in cui l'induttività è definita come il numero delle linee di forza aggiunte o sottratte da quelle che attraversano il circuito a cagione del cambiamento di corrente (v. pag. 206).

Lo sviluppo della scienza dell'elettricità è stato molto danneggiato dall'esistenza di tre sistemi differenti di unità, dette rispettivamente: unità elettrostatiche, elettromagnetiche e pratiche. Questa molteplicità di sistemi era dovuta all'ignoranza della vera natura del magnetismo, ed al prevalere di false analogie fra i fenomeni elettrici e magnetici. Noi vediamo ora come il magnetismo non sia altro che la rivoluzione degli elettroni. Talvolta venne opposta a questa affermazione l'obbiezione che vi sarebbe una qualche azione giroscopica dovuta ai minutissimi e innumerevoli giroscopi costituiti dagli elettroni in rivoluzione. Ma quest'obbiezione non tiene conto della estrema brevità del periodo di rivoluzione, brevità che consente all'elettrone di compiere delle rotazioni tali che anche l'ago di un galvanometro ad alta frequenza non dà indicazione sensibile.

La teoria degli elettroni, col suo logico corollario — il riconoscimento dell'elettricità come quantità fondamentale — comprende e spiega

tutti i fatti dipendenti dall'elettricità e dal magnetismo fino ad ora scoperti. Fra pochi anni, non v'ha dubbio, questa teoria sarà applicata a tutti i minimi particolari della scienza dell'elettricità.

INDICE ANALITICO

K

L

M

N

O

P

R

S

T

U

V

W

Z

69. Costa. **Il Buddha** . . . . L.
70. Solerti. **Le origini del melodramma** . . . » 3,5
71. Brofferio. **Per lo Spiritismo** . . . . . » 3,5
72. Clodd. **Storia dell'Alfabeto.** — Con figure . . . » 3 —
73. Del Lungo. **Goethe e Helmholz** . . . . . » 2 —
74. Finot. **La filosofia della longevità** . . . . » 3,50
75. Aliffi e Comanducci. **La liquefazione dei gas e dell'aria** . » 3 —
76. Fraccaroli. **L'irrazionale nella letteratura** . . . » 5 —
77. Conn. **Il meccanismo della vita** . . . . . » 3 —
78. Levi. **Delitto e pena nel pensiero dei Greci** . . . » 3,50
79. Del Cerro. **Fra le quinte della Storia** . . . . » 4 —
80. Viazzi. **Psicologia dei sessi** . . . . . . » 4 —
81. Sergi. **Evoluzione umana individuale e sociale** . . . » 3,50
82. Clodd. **L'uomo primitivo.** — Con figure . . . . » 2,50
83. Baldwin. **L'Intelligenza** . . . . » 4 —
84. Cappelletti. **La rivoluzione** . . . . . . » 5 —
85. Lombroso. **La vita dei bambini.** — Con figure . . . » 3 —
86. Emerson. **Uomini rappresentativi** . . . . . » 3,50
87. Moebius. **Inferiorità mentale della donna** . . . . » 2,50
88. Gumplowicz. **Il concetto sociologico dello Stato** . . . » 3,50
89. Agresti. **La filosofia nella letteratura moderna** . . . » 3,50
90. Lombroso. **I vantaggi della degenerazione.** — Con figure . » 3 —
91. Pegrassi. **Le illusioni ottiche.** — Con figure . . . » 2,50
92. Morasso. **La nuova arma (La macchina)** . . . . » 4 —
93. Menger. **Lo stato socialista** . . . . . . » 4 —
94. Canestrini. **Gli amori degli animali.** — Con figure . . » 3,50
95. Rizzatti. **Dalla pietra filosofale al radio.** — Con figure . » 3,50
96. Carlyle. **Passato e presente** . . . . . . » 5 —
97. Coughet. **Il ventre dei popoli** . . . . . . » 5 —
98. Bizzarri. **La base fisica del male** . . . . . » 2,50
99. Cappelletti. **Storie e leggende** . . . . . . » 5 —
100. Clodd. **Storia della creazione.** — Con figure . . . » 4 —
101. Zanotti-Bianco. **Astrologia ed astronomia** . . . . » 3,50
102. Hall. **Il suolo** . . . . » 4 —
103. Baratta. **Curiosità Vinciane.** — Con figure . . . » 3 —
104. Fraccaroli. **La questione della scuola** . . . . » 3 —
105. Evans. **Lao-tse e il libro della via e della virtù** . . » 3,50
106. Clodd. **Miti e sogni** . . . . » 3,50
107. Labanca. **Il papato** . . . . » 5 —
108. Villa. **L'idealismo moderno** . . . . . . » 5 —
109. Fanciulli. **L'individuo nei suoi rapporti sociali** . . » 3 —
110. Duclaux. **Igiene Sociale** . . . . » 4 —
111. Ravizza. **Psicologia della lingua** . . . . . » 3 —
112. Clodd. **Fiabe e filosofia primitiva** . . . . . » 3,50
113. Cappelletti. **Principesse e grandi dame** . . . . » 5 —
114. Niceforo. **Forza e ricchezza** . . . . . . » 3,50
115. Renda. **Le passioni** . . . . » 2,50
116. Romano. **La psicologia pedagogica** . . . . . » 4 —
117. Rizzatti. **Dal cielo alla terra** . . . . . . » 3,50
118. Canestrini. **Le società degli animali** . . . . » 3 —
119. Tonnini. **La psicologia della civiltà egizia** . . . » 5 —
120. Ferrucci. **Il traforo del Sempione e i passaggi alpini** . » 3,50
121. Lombroso e Carrara. **Nella penombra della civiltà** . » 3 —
122. Sacchi. **Istituzioni di Scienza occulta** . . . . » 5 —
123. Wilde. **Intenzioni** . . . . » 5 —
124. Loriga. **La struttura e le funzioni del corpo umano** . » 3,50
125. Baratono. **Psicologia sperimentale** . . . . . » 4 —
126. Fanciulli. **La coscienza estetica** . . . . . » 3,50
127. Key. **Il secolo dei fanciulli** . . . . . . » 3,50
128. Cappelletti. **Dal 2 Dicembre a Sedan.** — Con figure . » 5 —
129. Zini. **Giustizia** . . . . » 3 —
130. Ballard. **I miracoli dell'incredulità** . . . . » 4 —
131. Limentani. **La previsione dei fatti sociali** . . . » 5 —
132. Conn. **Il metodo dell'evoluzione** . . . . . » 5 —
133. Sergi. **La Sardegna** . . . . » 3 —
134. Lacey. **Il Cristo storico** . . . . » 2,50
135. Newman. **Fede e Ragione** . . . . » 6 —
136. De Lorenzo. **Terra madre** . . . . » 3 —
137. Bryce. **Imperialismo romano e brittannico** . . . » 5 —
138. Lumbroso. **Attraverso la rivoluzione e il primo impero** . » 5
139. Wegener. **Noi giovani! Il problema sessuale** . . . » 2,50
140. Snyder. **La nuova scienza** . . . . » 5 —

NB. — I volumi di questa serie esistono pure elegantemente legati in tela con fregi artistici, con *una lira* d'aumento sul prezzo indicato.